



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA “LA SAPIENZA”**

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche Naturali  
Corso di Laurea in Fisica

---

Tesi di Laurea  
In  
Geofisica

**EVOLUZIONE DELLA TRAZIONE DINAMICA SULLA  
FAGLIA DURANTE I FORTI TERREMOTI**

Relatore Interno  
Chiar.mo Prof. Michele Caputo

Relatore Esterno  
Dr. Massimo Cocco  
Dr. Elisa Tinti

Laureanda  
Elena Spagnuolo  
Matricola 693329

---

Anno Accademico 2005-2006

# Indice

## Introduzione

### Capitolo 1

La meccanica del terremoto.....	1.1
1.1 Meccanica della frattura, leggi d'attrito: il processo sismogenetico.....	1.2
1.1.1 Fagliazione, meccanica della frattura.....	1.2
1.1.2 I criteri di frattura.....	1.7
1.1.3 Attrito sulle faglie, la dislocazione sismica.....	1.11
1.2 Rappresentazione analitica della sorgente.....	1.16
1.2.1 L'equazione dell'elastodinamica.....	1.16
1.2.2 Il teorema di rappresentazione.....	1.18
1.3 Modelli di rappresentazione del meccanismo di faglia.....	1.22
1.3.1 Modello cinematico.....	1.22
1.3.2 Modello dinamico.....	1.24
1.3.3 Complessità della faglia.....	1.26
1.4 Le leggi costitutive.....	1.27
1.4.1 La legge slip weakening- SW.....	1.30
1.4.2 La legge rate and state -R&S1.....	1.33
1.4.3 Confronto tra legge SW e R&S.....	1.35
1.5 Caratterizzazione del piano di faglia.....	1.37
1.5.1 Sforzi principali e orientazione della faglia.....	1.38

### Capitolo 2

Modelli quasi dinamici per vincolare la trazione sul piano di faglia.....	2.1
2.1 I modelli cinematici di sorgente.....	2.2
2.2 Metodo quasi dinamico.....	2.7
2.2.1 Tecniche di calcolo numerico.....	2.8
2.3 Dati sperimentali utilizzati.....	2.12
2.4 Interpretazione dell'andamento della trazione.....	2.15
2.5 La scelta dello stress iniziale.....	2.19

### Capitolo 3

L'evoluzione della trazione dinamica per forti terremoti recenti.....	3.1
3.1 Modelli cinematici di alcuni terremoti recenti.....	3.2
3.1.1 Hector Mine.....	3.4
3.1.2 Denali.....	3.7
3.1.3 Parkfield.....	3.9
3.1.4 San Simeon.....	3.12

3.1.5	Fukuoka.....	3.14
3.1.6	Imperial valley.....	3.16
3.1.7	Landers.....	3.19
3.1.8	Northridge.....	3.23
3.1.9	Morgan Hill.....	3.25
3.1.10	Tottori.....	3.28
3.1.11	Kobe.....	3.32
3.1.12	Colfiorito.....	3.34
3.1.13	Superstition Hills.....	3.39
3.2	Calcolo delle trazioni.....	3.41
3.3	Calcolo dell'energia di frattura.....	3.52
3.3.1	Il calcolo delle distribuzioni sul piano di faglia.....	3.54

#### **Capitolo 4**

Considerazioni conclusive.....	4.1
4.1 Effetto del modello crostale.....	4.2
4.2 Le leggi di scala .....	4.5
4.2.1 Lo stress drop.....	4.5
4.2.2 Breakdown Work.....	4.10
4.3 Conclusioni .....	4.17

<b>Appendice A.....</b>	<b>5.1</b>
-------------------------	------------

<b>Appendice B.....</b>	<b>6.1</b>
-------------------------	------------

#### **Bibliografia**

# Introduzione

L'evento sismico è determinato dal rilascio dello sforzo accumulato in alcune zone della crosta terrestre ad opera del lento meccanismo di deformazione di origine tettonica che interessa gli strati elastico fragili della terra, ed è il risultato della trasformazione della componente elastica della deformazione tettonica nella componente plastica. La rapidità che caratterizza tale trasformazione rappresenta l'instabilità che caratterizza una struttura sismogenetica.

Il rilascio di sforzo su una sorgente sismica viene interpretato come una perturbazione al campo di stress iniziale che determina, sotto opportune condizioni, la rapida dislocazione dei due blocchi della faglia e la nucleazione e propagazione della frattura sulla superficie. La caduta di tensione è accompagnata dal rilascio dell'energia accumulata sotto forma di energia potenziale elastica; parte di essa viene spesa in meccanismi dissipativi e parte viene irradiata sotto forma di onde elastiche.

In questo lavoro si intende studiare la dinamica del processo sismogenetico, ovvero descrivere la fase del rilascio di sforzo attraverso la determinazione dell'evoluzione della trazione dinamica della faglia. Inoltre si vuole effettuare una stima dei principali parametri che caratterizzano l'andamento della trazione in funzione della dislocazione; in particolare, si vuole produrre una stima dell'energia spesa nei processi dissipativi durante la fase del rilascio di sforzo.

L'evoluzione spazio-temporale della trazione dinamica sul piano di faglia associata al terremoto è calcolata come soluzione dell'equazione dell'elastodinamica con opportune condizioni al contorno. In questo lavoro si è scelto di utilizzare una modellazione quasi dinamica che come condizione al contorno non utilizza una legge costitutiva imposta a priori, né i parametri dinamici che ne caratterizzano l'andamento, bensì le informazioni ottenute dall'inversione dei dati



geofisici cioè i modelli di cinematici di sorgente. In particolare si assegna la velocità di dislocazione come condizione al contorno e si risolve l'equazione dell'elastodinamica facendo uso di una tecnica numerica alle differenze finite. Tale metodo è stato applicato a forti terremoti reali per riprodurre il comportamento meccanico delle strutture sismogenetiche e per studiare in particolare i parametri dinamici e le eterogeneità dinamiche che caratterizzano una faglia reale.

Nel primo capitolo viene descritta la sorgente sismica attraverso l'equazione fondamentale dell'elastodinamica e viene mostrata la rappresentazione analitica del campo degli spostamenti in funzione della variazione della trazione dinamica. Di seguito viene introdotto il concetto di attrito che permette di descrivere l'evento sismico come uno scorrimento di superfici pre-fratturate e quindi vengono descritte le leggi costitutive utilizzate per risolvere la singolarità del campo di sforzo sul fronte di rottura e per vincolare la trazione durante la propagazione della frattura.

Nel secondo capitolo viene presentato il modello quasi dinamico utilizzato in questo lavoro per vincolare la trazione sul piano di faglia. Vengono descritte le tecniche di calcolo numeriche, boundary integral e differenze finite proposte da Andrews (1985 e 1987), e quindi viene illustrato il metodo proposto da Tinti et al. (2005) per ottenere la descrizione dinamica del processo.

Nel terzo capitolo, dopo aver presentato i terremoti analizzati in questo studio e aver descritto le caratteristiche salienti dei modelli cinematici di cui si è fatto uso, vengono discussi i risultati ottenuti per l'andamento locale della trazione e vengono analizzate le distribuzioni sul piano di faglia dei principali parametri dinamici stimati. In questo capitolo viene inoltre effettuata un'analisi sulla dipendenza dei parametri dinamici dall'operazione di *smoothing* effettuata sulla funzione che descrive la velocità di dislocazione (STF), sulla base delle valutazioni di Guatteri e Spudich (2004).

Nel quarto capitolo infine vengono mostrati gli effetti sull'evoluzione della trazione e sulla stima dei parametri dinamici dovuti all'utilizzo di un modello crostale 1-D piuttosto che un modello omogeneo. Vengono inoltre proposte e

discusse delle leggi di scala dei principali parametri dinamici. Tali leggi vengono ricavate sia per i valori dei parametri dinamici globali (mediati sul piano di faglia) che puntuali. Vengono infine presentate le principali conclusioni del lavoro svolto.

# Capitolo 1

## La meccanica del terremoto

Nella crosta terrestre si accumulano sforzi notevoli dovuti al continuo movimento di origine tettonica delle masse rocciose che compongono la terra. In superficie, tale dinamicità si manifesta attraverso diversi fenomeni come la subduzione delle placche oceaniche, le eruzioni vulcaniche, la crescita e mutazione delle catene orogeniche, i terremoti.

Il terremoto è un fenomeno che ha origine principalmente all'interno della crosta terrestre, quando le rocce che la compongono non sono più in grado di sopportare gli sforzi tettonici accumulati nel tempo. Durante il processo di frattura avviene l'emissione delle onde elastiche che si propagano fin sulla superficie. Rispetto alle scale temporali geologiche, l'evento sismico ha una durata insignificante (secondi), mentre l'intero ciclo sismogenetico, di cui il terremoto costituisce solo una breve fase, arriva a durare migliaia di anni. (Ref: Stein, 2003).

Il fattore principale all'origine dell'evento sismico è lo sforzo cui sono sottoposte alcune zone della crosta terrestre e il fenomeno è fortemente legato alle caratteristiche fisico chimiche dei materiali coinvolti e alla condizione di equilibrio tra le forze in gioco.

Lo stato di aggregazione dei minerali che compongono le rocce condiziona il tipo di reazione alla sollecitazione applicata, in funzione della direzione e dell'intensità. La roccia, in determinate condizioni di temperatura e pressione, è in grado di reagire allo sforzo cui è sottoposta deformandosi elasticamente finché la struttura che la costituisce è in grado di sostenerlo. Superato un certo valore di soglia, la roccia rilascia l'energia elastica accumulata creando una frattura.

Sotto quest'ottica, il terremoto è il risultato di una instabilità locale, che trasforma il lento movimento quasi statico di deformazione, in una situazione di alta

dinamicità. L'instabilità si produce in un punto chiamato ipocentro, la frattura si propaga su un piano, detto piano di faglia, le cui superfici subiscono uno spostamento relativo (*'dislocazione'*).

I terremoti avvengono principalmente su fratture (faglie) preesistenti e la liberazione dell'energia è strettamente legata alla tensione accumulata a causa dell'attrito statico tra i due lembi della faglia che ne impedisce lo scorrimento. Una volta superata la soglia di massima resistenza, si verifica una brusca caduta di tensione che provoca lo scorrimento relativo e il rilascio di energia. Quindi nonostante i terremoti siano associati a processi di frattura essi sono descritti da processi di dislocazione su fratture preesistenti, in cui l'attrito determina la stabilità e l'instabilità per la struttura.

In relazione a quanto visto in generale sul comportamento dei materiali sottoposti a sforzo, il terremoto libera energia attraverso la caduta di tensione accumulata. Questa in parte viene spesa per la creazione di nuova superficie e per la propagazione della frattura, in parte viene spesa nel meccanismo di deformazione elastica del volume, in parte viene dissipata sotto forma di calore e in parte si libera sotto forma di onde elastiche che si propagano nel mezzo fino a raggiungere la superficie terrestre. Sono proprio queste onde a fornire informazioni indispensabili per l'indagine dei processi fisici che originano i terremoti.

## ***1.1 Meccanica della frattura, leggi d'attrito: il processo sismogenetico***

### ***1.1.1 Fagliazione, meccanica della frattura***

La terra è considerata un mezzo elastico, deformabile e continuo in molte applicazioni geofisiche come lo studio della propagazione delle onde sismiche, lo studio della sorgente o lo studio delle oscillazioni libere della terra. In realtà la terra è composta da materiali con caratteristiche chimico fisiche che la rendono

discontinua ed eterogenea; tale eterogeneità si riflette nella propagazione delle onde sismiche all'interno della terra (vedi §1.3.3).

Le rocce sono composte da minerali, ovvero da stati aggregati di atomi e molecole in cui le forze di legame conferiscono al materiale diverse caratteristiche meccaniche dipendenti dalle condizioni di temperatura e pressione. Gli atomi e le molecole si dispongono nel minerale in modo di minimizzare l'energia potenziale media attraverso i legami, ovvero si dispongono su determinate posizioni di equilibrio andando a costituire l'impalcatura del minerale (reticolo). Questa struttura conferisce al minerale caratteristiche chimico fisiche anisotrope, ovvero dipendenti dalla direzione. Pertanto, lo stato di aggregazione delle rocce, condiziona fortemente la risposta del materiale ad una sollecitazione imposta.

I materiali possono essere studiati attraverso due casi ideali: il solido elastico e il fluido puramente viscoso.

Un solido elastico reagisce allo sforzo accumulando l'energia ottenuta dal lavoro delle forze esterne immagazzinandola sotto forma di energia potenziale. A sforzo cessato, restituisce quasi tutta l'energia accumulata.

Il comportamento sotto sollecitazione di un solido elastico è descritto dalla legge di Hooke (empirica), lo sforzo è proporzionale alla deformazione attraverso una costante caratteristica:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij} \quad (1.1)$$

dove  $\tau_{ij}$  è il tensore di sforzo,  $\varepsilon_{ij}$  il tensore di deformazione,  $C_{ijkl}$  è il modulo elastico che descrive le proprietà del materiale.

Un fluido puramente viscoso non ha una forma ben definita, le posizioni di equilibrio dei suoi elementi non sono disposte in una struttura regolare ordinata e il fluido spende tutta l'energia accumulata per disporre gli elementi che lo costituiscono sulle nuove posizioni. In questo caso lo sforzo dipende dalla velocità di deformazione, attraverso una costante caratteristica del materiale, la viscosità, ovvero la resistenza del mezzo alla deformazione irreversibile.

L'energia viene dissipata sotto forma di calore e pertanto non viene restituita.

Il comportamento sotto sollecitazione di un fluido puramente viscoso è descritto dalla Legge di Newton :

$$\tau_{ij} = \eta \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1.2)$$

dove:  $\eta$  è la viscosità e  $\dot{\epsilon}_{ij}$  la velocità di deformazione.

I comportamenti descritti sono ideali; i materiali, a seconda delle condizioni cui sono sottoposti, deviano da questo comportamento. I solidi elastici presentano una risposta lineare allo sforzo secondo la legge di Hooke fino ad un certo valore di sforzo detto di snervamento, dopo il quale escono dalla linearità, ovvero manifestano deformazione permanente al cessare dello sforzo applicato. In questo caso la dipendenza dello sforzo dalla deformazione presenta una curva di isteresi, la deformazione permanente è visibile nella fase di rilascio di energia. Il comportamento viene detto plastico.

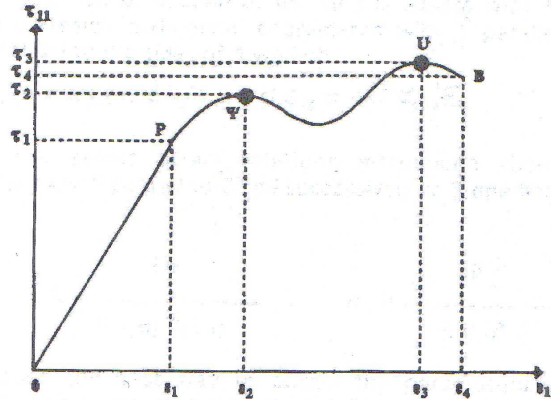
Oppure la risposta mostra una componente dipendente dalla velocità di deformazione e in questo caso il comportamento è detto viscoelastico.

Nel primo caso, raggiunto il valore di soglia, il materiale comincia a spendere l'energia accumulata nel tentativo di realizzare una nuova forma di equilibrio. L'energia necessaria a tale scopo dipende strettamente dalla struttura del materiale, ovvero dalla distanza relativa dei punti appartenenti ai piani del reticolo, poiché il lavoro dipende dallo spostamento. Una struttura che presenti delle irregolarità, ovvero dei siti liberi nel reticolo, può utilizzarli per raggiungere la nuova configurazione spendendo minore energia.

Durante questa fase, la tensione cala ad un valore inferiore, proprio a causa delle dislocazioni interne del materiale e resta costante intorno a questo valore mentre la deformazione continua a crescere.

Questa situazione permane finché, gli elementi, tutti addensati in una sola zona, cominciano a sviluppare forze repulsive, che ostacolano un ulteriore movimento. Questa fase è detta di incrudimento, la tensione cresce nuovamente e prepara ad una nuova fase di dislocazione che, in questo caso, origina la rottura dei legami,

quindi un aumento brusco della deformazione  $\epsilon$ , conseguentemente, la rottura.  
(Ref: Giudice – Dispense 2005).



**Figura 1.1:** Diagramma sforzo- deformazione.(Tratto da Caputo, 1999)

In Figura 1.1 è riportato l'andamento descritto: per  $\tau < \tau_1$ , ovvero nel primo tratto rettilineo, il comportamento è elastico (fino al punto P); al crescere di  $\tau$  fino al valore  $\tau_2$  il tratto si incurva e presenta un comportamento di tipo elasto - plastico e in seguito quello plastico (fino al punto  $\Psi$ ).

$\tau_2$  rappresenta la tensione di snervamento, in questo tratto la tensione inizialmente diminuisce mentre la deformazione continua a crescere notevolmente, per poi crescere ulteriormente con pendenza molto minore rispetto alla fase elastica; quest'ultima viene detta fase di incrudimento. Successivamente la tensione sale fino a raggiungere  $\tau_3$  (punto U) che rappresenta la massima trazione che il materiale è in grado di sostenere; in B materiali friabili, come l'acciaio a basso tenore di carbonio, rompono mentre i materiali duttili prima di rompere si assottigliano e in seguito rompono.

Nel caso di comportamento viscoelastico la differenza fondamentale sta nel fatto che si introduce una componente della deformazione dipendente dal tempo. Un materiale sottoposto ad alte temperature, maggiori della temperatura di fusione,

può deformarsi quando sottoposto a tensione costante nel tempo (*creep*) e viceversa, se soggetto a deformazione costante, la tensione può diminuire nel tempo (*stress relaxation*).

Il gradiente termico medio della terra è pari a circa  $30^\circ$  per 1km di profondità. In realtà tale gradiente presenta delle anomalie dovute ad esempio ai fenomeni di frizione dei margini attivi delle zolle in subduzione, o ai movimenti convettivi che trasportano in superficie materiali caldi degli strati più interni. Tali condizioni di temperatura e pressione fanno sì che materiali solidi come le rocce si comportino in realtà come fluidi viscosi. In un fluido viscoso si accumulano tensioni di taglio dovute al movimento degli strati inferiori caldi, relativamente agli strati superiori freddi. Tali tensioni producono sugli strati attigui più freddi, una deformazione di tipo elastico, poiché agiscono su di essi in modo costante nel tempo.

Un'instabilità locale del sistema sismogenetico si produce quando un punto della zona sottoposta a sforzo supera il valore critico della tensione, cede improvvisamente e crea una frattura a spese dell'energia elastica accumulata.

L'instabilità si traduce nell'aumento della deformazione con il diminuire dello sforzo. Il punto in cui si produce tale instabilità per il sistema sismogenetico, viene detto 'ipocentro'.

Il mezzo è, come già accennato eterogeneo, e questo fa sì che alcune zone della superficie sollecitata, raggiungano le condizioni critiche più velocemente degli altri. La frattura esercita una tensione aggiuntiva sul materiale circostante, e può creare le condizioni necessarie affinché almeno uno dei punti attigui possa rompere. In questo caso la rottura inizia a propagarsi sul piano di faglia e il fronte di rottura (crack tip) si muove a velocità simili a quella delle onde di Rayleigh o addirittura a volte superiori alla velocità delle onde - S (condizione di rottura *supershear*).

Il processo di fagliazione è costituito da tre fasi:

- 1) la nucleazione, ovvero la fase in cui, raggiunto il punto critico nel mezzo, si crea una condizione di instabilità, la deformazione aumenta drasticamente ed avviene l'iniziazione della frattura.



2)La propagazione, ovvero la fase in cui la frattura creata trova le condizioni adatte per propagarsi nel mezzo. Lo sforzo totale agente sul mezzo deve essere superiore o uguale allo stato critico. Questa fase è caratterizzata dall'emissione delle onde sismiche nel mezzo e dal rilascio di energia.

3)L'arresto, è la fase in cui cessano di esistere le condizioni opportune alla propagazione e la frattura si ferma, ovvero cicatrizza (healing).

Lo stato di stabilità, dopo l'arresto della frattura, può durare per decine o migliaia di anni, finché non si riaccumuli la tensione e si riproducano nuove condizioni di instabilità. L'instabilità sismogenetica costituisce solo un breve momento dell'attività della faglia. (Ref: Stein,2003).E' però necessario che la faglia possa nuovamente accumulare energia, questa fase viene anche chiamata '*restrengthening*'.

Nell'ambito della meccanica della frattura sono stati introdotti dei criteri atti a determinare, dal punto di vista fisico-analitico, le condizioni in cui il meccanismo di rottura può avere luogo. Saranno analizzati in dettaglio nei paragrafi successivi.

### **1.1.2 I criteri di frattura**

I criteri di frattura sono relazioni fisiche sviluppate nell'ambito della meccanica della frattura atte a stabilire le condizioni meccaniche affinché il processo di rottura cosismica e di fagliazione possa iniziare.

Nel 1921 Griffith stabilì un criterio espresso in termini di flusso di energia, basato su un bilanciamento energetico, per determinare le condizioni necessarie affinché la propagazione della frattura possa avere luogo. In base a questo criterio è necessario che il flusso di energia associato alla deformazione e al carico tettonico (applicato),  $G$ , sia almeno pari o maggiore di un valore critico  $G_c$ , (criterio di Griffith – Griffith, 1921; Madariaga,1983):

$$G \geq G_c \quad (1.3)$$

Questo valore di soglia corrisponde all'energia di superficie ( $\gamma$ ); poiché il criterio è applicato ad un mezzo elastico ed è un criterio statico tutta l'energia potenziale viene spesa per far avanzare la frattura. La creazione della frattura richiede lavoro da parte delle forze esterne poiché essa necessita un incremento dell'energia interna (figura 1.2)

$$G = \frac{\Delta W}{\Delta x} = 2\gamma \quad (1.4)$$

Perché la frattura possa propagarsi, l'energia totale deve ridursi, mentre l'energia di superficie cresce con l'estensione della frattura a spese del lavoro delle forze esterne che si oppongono alla creazione della nuova area di superficie; l'equilibrio è raggiunto quando questi due contributi opposti si bilanciano.

Un modello analogo è quello di Irwin (1948) che invece propose un criterio basato sul concetto di '*fattore di intensità di sforzo*', ovvero espresso in termini di concentrazione di sforzo.

In questi modelli il piano di faglia può essere suddiviso in due zone: quella fratturata,  $S1$ , e quella esterna al fronte di rottura,  $S2$ .  $S2$  è ancora soggetta ad un aumento della trazione dovuta al fronte di rottura in avvicinamento mentre  $S1$  ha dislocato in seguito al rilascio di sforzo dovuto alla fratturazione. La linea di contatto tra le due superfici è detta '*fronte di rottura*' (crack tip). Il fronte di rottura avanza finché ne ha la possibilità, vincendo le forze coesive che si oppongono alla frattura, ma al confine con la regione  $S2$ , ovvero sul fronte, ne risulta una singolarità, prodotta dall'elevato sforzo dinamico (infinito!) che ancora non ha prodotto la rottura.

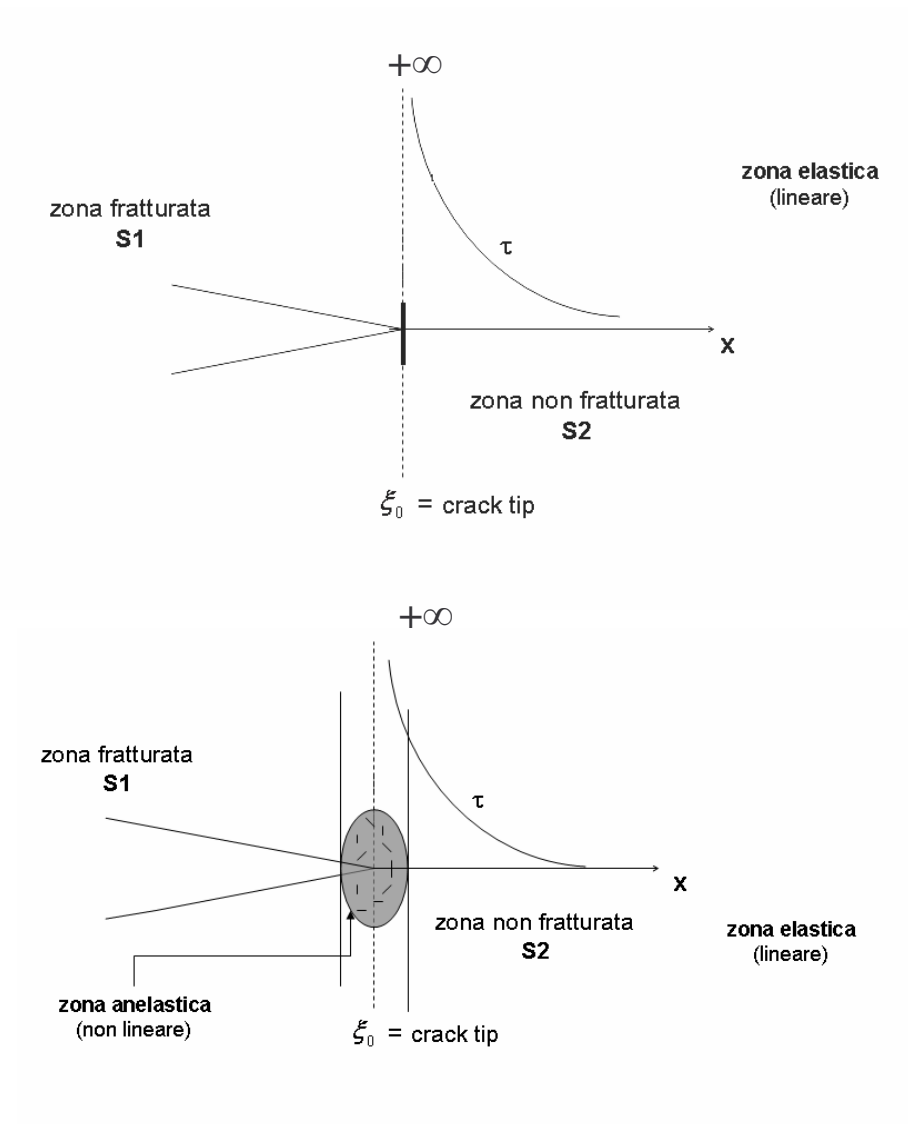


Figura 1.2 In alto: Zona di frattura nell'interpretazione di Griffith. In basso: Zona di frattura nell'interpretazione di Irwin.

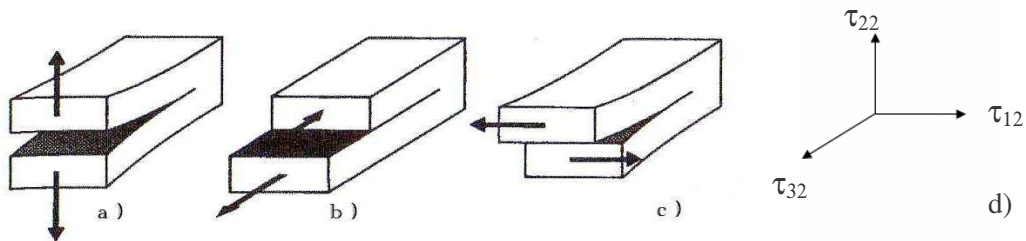
Il campo di sforzo lungo la frattura può essere rappresentato come segue:

$$\{\tau_{22}, \tau_{12}, \tau_{32}\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi R}} \{K_I, K_{II}, K_{III}\} \quad (1.5)$$

dove  $R$  rappresenta la distanza dal punto di rottura in cui risulta evidente la singolarità in  $R=0$ , ovvero al crack tip; gli sforzi sono orientati come mostrato in figura 1.3d.

$K_{II}$  è il fattore d'intensità dello sforzo e quantifica lo sforzo nelle zone vicine al fronte di rottura. I pedici corrispondono ai tre possibili modi in cui può propagarsi la frattura, come illustrato in Figura 1.3 (tensile, in-plane, antiplane). (Ref : Madariaga).

In base al modello di Irwin il criterio di frattura viene espresso in termini del fattore di intensità di sforzo  $K_c$ ; la frattura avviene e si propaga quando  $K \geq K_c$ .



**Figura 1.3:** modi di propagazione della frattura: a) tensile (modo I) b) in-plane (modo II) c) anti-plane (modo III) (tratto da Scholz, 1990) d) sistema di riferimento di  $\tau_{ij}$ .

Lo sforzo al crack tip ha un valore singolare, e questa situazione rivela un carattere non fisico della soluzione poiché essa esprime il fatto che la concentrazione di sforzo sul fronte di rottura è infinito, e nessun materiale è in grado di sopportare una tale condizione.

Irwin non elimina la singolarità dello sforzo ma introduce una zona microscopica di deformazione non lineare (plastica) che giustifichi l'assorbimento di una parte dell'energia attraverso il concetto di energia di superficie effettiva  $\gamma_{eff}$ :

$$G = 2\gamma_{eff} = 2\gamma + \Delta q \quad (1.6)$$

dove  $\Delta q$  è il contributo dei processi dissipativi e l'assorbimento dell'energia è legata alla formazione di fratture microscopiche.

Ida (1972) rimuove la discontinuità definendo in modo più esauriente il concetto di zona di deformazione non lineare per fratture di taglio attraverso una condizione più completa rispetto al criterio di frattura, sviluppando una legge capace di descrivere appieno la dinamica del processo fisico; tale legge è detta '*legge costitutiva*', e verrà discussa nei paragrafi successivi.

### **1.1.3 Attrito sulle faglie, la dislocazione sismica**

In seguito alla rottura, lo scorrimento relativo dei due lembi della faglia è controllato dall'attrito. L'attrito è una misura della resistenza che un corpo oppone al moto di scorrimento tangenziale di due superfici a contatto, e una sua variazione nel tempo può tradursi in una rapida dislocazione associata ad una brusca caduta di tensione.

La variazione temporale dell'attrito causa fasi alterne di instabilità e stabilità della struttura sismogenetica che vanno a costituire le fasi (*presismica*, *cosismica*, *postsismica*, *intrasismica*) di un comportamento ciclico (ciclo sismico) che prende il nome di meccanismo '*stick slip*' (Brace e Byerlee, 1966).

Nei paragrafi precedenti si è affrontato il problema della meccanica della frattura, e si sono esaminati i criteri adottati allo scopo di risolvere la zona di singolarità al crack tip. Tuttavia si è trascurato il contributo dell'attrito che esiste su tutta la faglia e che ha un peso rilevante nel bilancio energetico. Infatti il lavoro fatto dalle forze che gli si oppongono non è valutabile attraverso il criterio di frattura, che risulta valido solamente in termini locali e non generali. (Ref: Scholz, 1990).

Mohr e Coloumb furono i primi a formulare un criterio che tenesse conto della componente di sforzo che realizza l'attrito, mettendo in relazione diretta lo sforzo di taglio e quello normale. Una frattura nella roccia può propagarsi nel momento

in cui si eccede una combinazione critica dello sforzo di taglio e di quello normale (criterio di frattura di Coloumb – Mohr)<sup>1</sup>:

$$|\tau| = \tau_0 - \nu\sigma \quad (1.7)$$

dove  $\tau_0$  e  $\nu$  sono rispettivamente lo sforzo coesivo e il coefficiente di attrito interno, proprie del materiale,  $\tau$  e  $\sigma$  rispettivamente lo sforzo di taglio e lo sforzo normale. Tale criterio si basa su un concetto introdotto da Coloumb, che associa il fenomeno dell'attrito alla presenza di protuberanze microscopiche sulle superfici in scorrimento. Tali protuberanze sono dette '*asperità*'.

Proprio da quest'idea trae origine il concetto moderno d'attrito (Bowden e Tabor, 1950,1964) Le asperità presenti sulla superficie dei due lembi della faglia sostengono la componente normale del carico che sollecita la dislocazione e, nell'insieme, rappresentano l'effettiva superficie di contatto.

Le asperità reagiscono alla sollecitazione deformandosi e generando zone di contatto in grado di sostenere il carico totale, estendendo nel tempo, la superficie di contatto effettiva, e la componente normale dello sforzo risulta essere proporzionale a tale superficie attraverso un fattore che misura il grado di rugosità del materiale.

$$N = pA_r \quad (1.8)$$

Dove:  $N$  è il carico normale e  $p$  è la '*penetration hardness*', ovvero il grado di penetrazione delle zone di contatto,  $A_r$  è la superficie di contatto effettiva.

---

<sup>1</sup> Il ciclo di Mohr è un'ottima rappresentazione grafica del problema. Nel circolo è rappresentato l'andamento dello sforzo rispetto agli assi principali. Il criterio è rappresentato graficamente da rette che costituiscono la soglia oltre la quale il materiale cede e si libera lo scorrimento. (Ref: Stein, 2003)

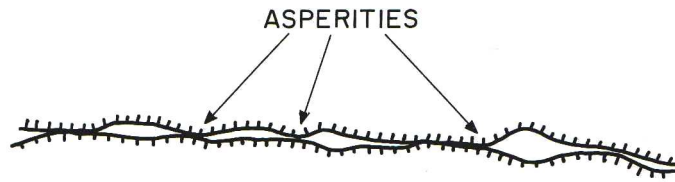


Figura 1.4: Le asperità sulle due superfici di contatto (Tratto da Scholz, 1990).

In condizioni statiche le asperità possono essere identificate con delle molle che reagiscono al carico deformandosi elasticamente; la deformazione introduce una componente tangenziale che permette un lento scorrimento relativo, stabile e asismico. La componente tangenziale risulta a sua volta proporzionale alla superficie di contatto attraverso una costante che misura il grado di resistenza al taglio.

$$F = sA_r \quad (1.9)$$

dove  $F$  è il carico di taglio,  $s$  è la resistenza al taglio.

Combinando la (1.8) e la (1.9) l'attrito può essere descritto con un unico parametro, il coefficiente d'attrito definito come:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{s}{p} \quad (1.10)$$

Poiché l'area di contatto effettiva è controllata dalla deformazione delle asperità in risposta al carico normale, l'equazione (1.10) è cruciale nella comprensione del fenomeno. Nella (1.11) l'attrito risulta proporzionale a tale carico e risulta indipendente dall'area di contatto effettiva attraverso la componente di taglio introdotta dalla deformazione.

Nonostante la teoria classica dell'attrito non vada oltre la semplice distinzione tra attrito statico e attrito dinamico, noi oggi sappiamo che il coefficiente d'attrito che caratterizza la zona di faglia dipende dal tempo. Infatti, è noto che una faglia

genera ripetuti terremoti e che le sue proprietà meccaniche possono variare nel tempo. Questo indica che tale coefficiente non è costante ma risulta dipendente dalle proprietà reologiche del mezzo. Durante i ripetuti eventi sismici su una medesima zona tra le due superfici si verificano fenomeni di abrasione (gouge) e variazioni della ruvidità delle superfici che spiegano l'evoluzione del coefficiente di attrito. I contatti variano nel tempo conferendo al coefficiente d'attrito una dipendenza temporale in grado di giustificare un modello che tenga conto di un meccanismo di riaccumulo della tensione.

La variazione dell'attrito rappresenta un'instabilità per il sistema: se le forze che sollecitano la dislocazione sono in grado di vincere l'attrito statico, la tensione accumulata nella fase di costrizione crolla ad un valore costante e la faglia disloca, liberando energia.

Durante la fase di scorrimento il meccanismo è guidato da un diverso valore d'attrito, quello dinamico inferiore al valore dell'attrito statico. Questa constatazione sperimentale è supportata dal comportamento delle asperità durante il processo. L'attrito statico aumenta in valore nel tempo a causa delle interazioni tra asperità e del processo di deformazione che estende la superficie di contatto. L'attrito dinamico al contrario, decresce con l'aumento della velocità di slip, con un andamento logaritmico (Dieterich, 1981).

Da un punto di vista numerico tale processo il meccanismo viene studiato attraverso un apparato meccanico, lo Spring Slider (Gu et. al, 1984), costituito da due piani in movimento relativo, (Figura 1.5): quello superiore comunica ai blocchi, posti sul piano inferiore, una forza tangenziale. I blocchi trasmettono la forza ai successivi attraverso delle molle.

Il blocco inizia a muoversi quando la forza  $F$ , trasmessa al blocco dalla molla, raggiunge un certo valore dell'attrito statico  $F_s$ .

$$F_s = k_s P \quad (1.11)$$

$K_s$  è il coefficiente di attrito statico,  $P$  è la forza normale al blocco che genera lo sforzo normale  $\sigma_n$ .

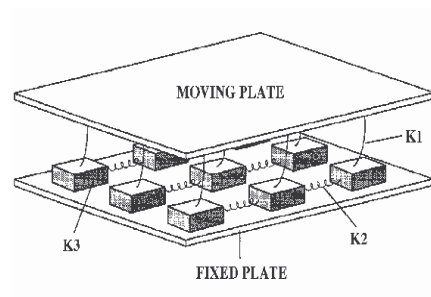


Quindi:

$$\frac{F_s}{A} = k_s \sigma_n = \tau_s \quad (1.12)$$

Quando  $F > F_s$  il blocco si mette in movimento ed entra in gioco l'attrito dinamico  $F_d$ , una forza che si oppone al moto:

$$F_d = k_d P \quad (1.13)$$



**Figura 1.5:** Spring Slider in due dimensioni  
( Tratto da Nathan Winslow - Introduction to Self-Organized Criticality & Earthquakes)

L'introduzione di una dipendenza del comportamento dal tempo è il punto nodale della descrizione del processo. L'introduzione di questa dipendenza, permette di studiare la dinamica del terremoto sulla faglia.

A questo scopo sono state introdotte delle leggi, note con il nome di leggi costitutive, atte a descrivere lo stato di sforzo sul piano di faglia prima di un evento sismico e durante la propagazione della rottura. Rimandiamo la trattazione di tali leggi ai paragrafi successivi.

## 1.2 Rappresentazione analitica della sorgente

### 1.2.1 L'equazione dell'elastodinamica

La dislocazione rappresenta una discontinuità del campo degli spostamenti ed è la risposta del sistema alla fase di instabilità creata dalla improvvisa caduta di tensione.

La deformazione non è elastica, ma sotto un punto di vista analitico, può essere associata alla superficie di frattura, mentre il mezzo circostante risponde alla sollecitazione elasticamente.

Il meccanismo è allora descritto dall'equazione fondamentale dell'elastodinamica:

$$\rho \ddot{u}_i = \tau_{ij,j} + f_i \quad (1.14)$$

dove  $\vec{u}(x,t)$  è il vettore del campo degli spostamenti, e  $\rho(x)$  è la densità del mezzo elastico,  $\tau_{ij,j}$  (usiamo il formalismo  $\tau_{ij,j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$ ) è la componente  $i$ -esima delle

forze di volume interne  $f_i$  è la componente  $i$ -esima della forza di volume.

La soluzione dell'equazione , rappresenta il campo degli spostamenti prodotti dalla dislocazione nel mezzo lineare omogeneo isotropo.

Il tensore di sforzo associato al vettore del campo degli spostamenti è nella forma:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1.15)$$

Dove  $C_{ijkl}$  è detto tensore delle costanti elastiche e caratterizza il comportamento elastico di un materiale indipendentemente dalla deformazione,  $\varepsilon_{kl}$  è il tensore di deformazione.

Per materiali isotropi esso dipende da due soli moduli elastici indipendenti, e può essere espresso nella forma:

$$C_{ijkl} = \lambda \partial_{ij} \partial_{kl} + \mu (\partial_{ik} \partial_{jl} + \partial_{il} \partial_{jk}) \quad (1.16)$$

dove  $\lambda$  e  $\mu$  sono le costanti di Lamé,

La (1.16) esprime la dipendenza lineare dello sforzo dalla deformazione (legge di Hooke generalizzata). Poiché si considera il mezzo isotropo e omogeneo, le 81 componenti (21 per via delle proprietà di simmetria) del tensore  $C_{ijkl}$  si riducono a due e la (1.15) può risciversi come:

$$\tau_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (1.17)$$

Dove  $\lambda$  e  $\mu$  sono le costanti di Lamè ed  $\varepsilon_{ij}$  sono le componenti del tensore di deformazione.

Questa equazione è ricavata nell'ambito della teoria lineare elastica,  $\lambda$  e  $\mu$  sono due costanti elastiche di un mezzo isotropo, omogeneo, che rappresentano completamente il tensore di quarto ordine  $C_{ijkl}$ .

Per piccole deformazioni si definisce il tensore di deformazione

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (1.18)$$

che lega lo spostamento alla deformazione.

Gli indici associati a  $u$  rappresentano la componente i-esima, j-esima della matrice di spostamento.

Le tre equazioni (1.16), (1.17), (1.18) costituiscono un sistema di equazioni differenziali completo che risolve il moto di un mezzo continuo e linearmente

elastico. L'unicità della soluzione del sistema richiede l'assegnazione di determinate condizioni iniziali e al contorno:

$$u_i = \dot{u}_i = 0 \quad (1.19)$$

condizione iniziale per  $t=0$ .

$$\tau_{ik} n_k = 0 \quad (1.20)$$

condizione al contorno sulla superficie terrestre (si richiede che si annullino le trazioni sulla superficie libera).

Assegnate le opportune condizioni al contorno, anche sul piano di faglia, è possibile risolvere il sistema e trovare una soluzione; il campo di spostamenti prodotto dalla dislocazione nel mezzo lineare omogeneo isotropo viene calcolato successivamente facendo uso del teorema di rappresentazione.

### **1.2.2 Il teorema di rappresentazione**

Un corpo elastico, sollecitato da una forza  $\vec{F}$ , si deforma in modo da spostare i suoi punti su nuove posizioni d'equilibrio. In condizioni di equilibrio stabile, l'equazione dell'elastodinamica può essere risolta annullando i termini nelle derivate parziali degli spostamenti ( $\ddot{u}_i$ ) che riguardano il caso dinamico. La linearità del problema permette di scrivere le componenti dello spostamento prodotto dall'applicazione di una forza  $\vec{F}$  come combinazione lineare delle tre componenti della forza:

$$u_i = G_{ij} F_j \quad (1.21)$$

dove  $G_{ij}$  è il tensore di Somigliana.

La (1.21) vale nel caso statico in cui non c'è evoluzione temporale del processo (la dislocazione è creata istantaneamente).

Quando il sistema raggiunge l'instabilità, le forze applicate sono variabili nel tempo. Questa variazione produce un'accelerazione che permette alla deformazione di propagarsi come forma d'onda. Supponendo che la sorgente (dove la forza è applicata) sia in  $(\xi, t)$ , nel punto  $(x, \tau - t)$  il moto del suolo è dovuto a due contributi, quello della sorgente, e quello della risposta del mezzo alla sollecitazione.

In quest'ultimo caso ci troviamo a studiare un problema dinamico in cui l'equazione dell'elastodinamica non può essere risolta usando una teoria lineare. Nella soluzione compare un termine che esprime la dipendenza della soluzione dal tempo. Questo termine è il tensore di Green, del secondo ordine, l'equivalente del tensore di Somigliana nel caso statico. Il tensore di Green è la risposta del sistema ad una forza unitaria ed impulsiva, pertanto il contributo al moto del suolo in un punto distante dalla sorgente è dato dalla propagazione di una sollecitazione impulsiva (funzione di Green nel mezzo).

Lo spostamento infinitesimo, prodotto dalla forza  $\vec{F}$ , sarà pertanto descritto da termini che tengano conto della propagazione dell'impulso, e del principio di causalità:

$$du_i = f(t - \tau)g(t) = g(t - \tau)f(t) \quad (1.22)$$

Dove  $f(\tau)$  è una funzione sorgente scalare che produce un segnale scalare  $u(t)$  e  $g(t)$  è il propagatore. La 1.22 integrata, nel caso di sorgente estesa, può essere interpretata come il prodotto di convoluzione tra il tensore di Green e la forza  $\vec{F}$ :

$$u_i = F_j * G_{ij} \quad (1.23)$$

Il teorema di rappresentazione lega la dislocazione avvenuta sulla faglia al campo di spostamenti prodotto nel mezzo omogeneo, isotropo, elastico e pertanto permette di studiare l'equazione dell'elastodinamica sulla faglia sfruttando gli osservabili diretti come il moto del suolo sulla superficie.

Il teorema di rappresentazione è l'estensione del teorema di reciprocità, formulato da Betti (1800), al caso di spostamenti dipendenti dal tempo. Tale teorema esprime il concetto di forze equivalenti e la sua formulazione si basa sul concetto che, presi due sistemi di forze A e B: *Il lavoro indiretto che compie un sistema di forze A già applicato durante l'applicazione di un sistema di forze B è uguale al lavoro indiretto che compie il sistema di forze B già applicato durante l'applicazione di un sistema di forze A.*

Se si assegnano opportunamente le forze impulsive si perviene alla seguente:

$$G_{nm}(\bar{\xi}_2, \tau_2; \bar{\xi}_1, \tau_1) = G_{nm}(\bar{\xi}_1, -\tau_1; \bar{\xi}_2, -\tau_2) \quad (1.24)$$

ovvero al teorema di Betti che mostra la reciprocità delle soluzioni nello spazio e nel tempo dove  $G_{in}(\bar{x}, t; \bar{\xi}, \tau)^2$  è il tensore di Green che rappresenta lo spostamento in direzione  $i$  causato da una forza unitaria ed impulsiva di direzione  $n$  ed è la soluzione dell'equazione dell'elastodinamica:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} G_{in}(\bar{x}, t; \bar{\xi}, \tau) = \delta(\bar{x} - \bar{\xi}) \delta(t - \tau) \delta_{in} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( C_{ijkl} \frac{\partial}{\partial x_l} G_{kn}(\bar{x}, t; \bar{\xi}, \tau) \right) \quad (1.25)$$

Si capisce allora l'importanza del teorema di reciprocità, perché quando si conosce la soluzione, ovvero lo spostamento causato da una forza impulsiva, tale teorema permette di ricavare la soluzione per un qualunque campo di forze di volume.

---

<sup>2</sup> Le funzioni di Green del mezzo elastico, dipendono dalla densità e velocità delle onde, dalla direzione della radiazione, dalla distanza  $r$ . La dipendenza dalla distanza è esplicita nei tre integrali che compongono la funzione di Green: uno di 'campo vicino', due di campo lontano. Il campo lontano permette di fare un'approssimazione a sorgente puntiforme, il campo vicino richiede una descrizione accurata della sorgente.

Il teorema di rappresentazione deriva dal teorema di reciprocità come suo integrale nel tempo (sulla base del teorema di Graffi), e i due sistemi di forze, nel caso del sistema sismogenetico, sono costituiti da forze di volume e di superficie; scegliendo per uno dei due sistemi una forza impulsiva e il tensore di Green, sua soluzione, la dislocazione in un punto della faglia può essere ricavata come segue:

$$u_n(\vec{\xi}, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt \iiint_V \{G_{in}(\vec{x}, t - \tau; \vec{\xi}, 0) \cdot f_i(\vec{x}, t)\} dV + \quad (1.26)$$

$$+ \int_{-\infty}^{+\infty} dt \iint_S \{G_{in}(\vec{x}, t - \tau; \vec{\xi}, 0) \cdot T_i(\vec{x}, t) - u_i(\vec{x}, t) \cdot n_j (C_{ijkl} G_{kn,l}(\vec{x}, t - \tau; \vec{\xi}, 0))\} dS$$

La superficie  $S$  include due superfici interne  $\Sigma_+$  e  $\Sigma_-$  che dislocano, l'una relativamente all'altra. Il vettore spostamento in  $(x, t)$  può essere calcolato a partire dalla (1.27) scambiando il ruolo del punto di osservazione e della sorgente e facendo uso della (1.24); esso risulta una somma di tre contributi:

$$u(\vec{x}, t) = \int_V d\tau \int G_{in}(\vec{x}, t - \tau; \vec{\xi}, 0) f_i(\vec{\xi}, t) dV + \quad (1.27)$$

$$- \int_\Sigma d\tau \int [C_{ijkl} G_{nk,l} u_i(\vec{\xi}, t) n_j] dS + \int_\Sigma d\tau \int [G_{ni}(\vec{x}, t - \tau; \vec{\xi}, 0) T_i(\vec{\xi}, t)] dS$$

Dove  $C_{ijkl}$  è il tensore delle costanti elastiche,  $G_{in}$  è il tensore di Green,  $n_j$  è il vettore normale alla superficie di dislocazione  $\Sigma$ ,  $T_i$  la componente  $i$ -ima della trazione.

A secondo membro, il primo integrale è un integrale di volume della forza esterna moltiplicata per la funzione di Green; il secondo e il terzo termine sono integrali di superficie; la parentesi quadra rappresenta la differenza tra il valore calcolato su una superficie interna e l'altra.

Tramite il teorema di rappresentazione è possibile calcolare il moto del suolo in un qualsivoglia punto dello spazio, ma è anche possibile impostare il problema inverso per lo studio della sorgente.

Lo studio della sorgente può essere affrontato da due punti di vista:

(1.1) Un approccio *cinematico* che descrive il processo a prescindere dalle cause che lo hanno generato e fornisce la rappresentazione del campo degli spostamenti e l'andamento della velocità di rottura sul piano di faglia. Un approccio di questo tipo costituisce un'analisi generale del meccanismo, descrive il processo senza entrare nel merito del contenuto fisico che ne è alla base, e permette di simulare l'evoluzione del processo di dislocazione e di produrre la stima di parametri di sorgente quali : il momento sismico, le dimensioni della faglia, la dislocazione, il rise time, la velocità di rottura.

(1.2) Un approccio *dinamico*, che descrive la dinamica del processo di frattura in una zona soggetta a sforzo preesistente di origine tettonica. Il modello dinamico descrive il processo di fagliazione nelle sue tre fasi, nucleazione propagazione e arresto, descrive l'evoluzione del sistema e dei parametri fisici che lo governano.

La caratterizzazione dinamica della sorgente non è di facile determinazione a causa della mancanza di osservabili dirette. In un modello cinematico la radiazione sismica costituisce uno strumento esauriente per la determinazione delle caratteristiche della sorgente. Nel caso dinamico la componente ad alta frequenza della radiazione sismica, che contiene le informazioni dinamiche, è contaminata dalla complessità della sorgente, e parzialmente assorbita dal mezzo in cui l'onda si propaga.

## ***1.3 Modelli di rappresentazione del meccanismo di faglia***

### ***1.3.1 Modello cinematico***

Il modello cinematico descrive il terremoto mediante l'evoluzione temporale dello scorrimento sul piano di faglia; dato un vettore di dislocazione sul piano di faglia,



è possibile trovare la deformazione nel punto  $x$  della superficie terrestre e all'istante  $t$  dal teorema di rappresentazione con opportune condizioni al contorno. In particolare, tramite teorema di rappresentazione, il modello cinematico permette di ricostruire il moto del suolo in un punto lontano dalla piano di faglia, tramite l'assegnazione a priori di un modello di sorgente.

Si assume una trazione continua e si valuta la discontinuità del vettore di spostamento tra le due superfici interne. Trascurando i termini di volume (la gravità) l'equazione (1.27) si riduce a:

$$u_i(\vec{x}, t) = \int_{\Sigma} d\tau \int C_{ijkl} G_{nk,l}(\vec{x}, \vec{\xi}, t - \tau, 0) \Delta u_i(\vec{\xi}, t) n_j dS \quad (1.28)$$

dove:

$$\Delta u_i = [u_i|_{\Sigma^+} - u_i|_{\Sigma^-}]$$

rappresenta la discontinuità della dislocazione sul piano di faglia.

$G_{nk,l}$  è la derivata della funzione di Green che rappresenta il campo degli spostamenti causato dalla sollecitazione impulsiva e unitaria all'interno del mezzo elastico.  $\Sigma$  è la superficie su cui si è verificato lo scorrimento, non è restrittivo limitare l'integrale alla zona di dislocazione perché fuori da questa superficie lo slip è nullo, e l'integrale non dà contributo.

La ricostruzione della radiazione sismica (sismogramma sintetico) è ottenuta dalla soluzione della (1.28), quando siano assegnati: il modello dei tempi di rottura, la distribuzione della dislocazione sul piano di faglia, la velocità delle onde elastiche, la geometria della sorgente. Il metodo viene detto *metodo diretto* (Spudich & Archuleta, 1987) poiché i parametri di sorgente sono assegnati a priori.

La 1.28 permette anche la risoluzione del problema inverso (Spudich, 1980) ovvero la determinazione del modello di sorgente a partire dalla conoscenza del

sismogramma registrato. Tale metodo viene detto *metodo inverso* e verrà descritto in modo più approfondito nel capitolo successivo.

### 1.3.2 Modello dinamico

Nell'approccio dinamico vengono studiate le forze che generano la dislocazione sul piano di faglia.

Das e Aki dimostrano che, per ragioni di simmetria, gli sforzi, su piani diversi da quello su cui si trova la superficie di faglia, sono nulli, pertanto non sarà restrittivo limitare lo studio del processo al solo piano in cui è contenuta la faglia.

Lo sforzo iniziale di taglio è quello preesistente, dovuto alla deformazione delle rocce che costituiscono il mezzo. Dopo la creazione della frattura, a questo se ne aggiunge un altro, il quale, data la natura relativamente istantanea del processo, può essere trattato come una perturbazione a quello iniziale e costituisce il contributo dovuto alla propagazione dinamica della frattura.

L'equazione (1.28) si riduce a:

$$u_n(x_1, x_2, t) = \int_0^t d\tau \int_{\Sigma(\tau)} \tilde{G}_{n\alpha}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2, t - \tau) \sigma_{\alpha 3}^p dS \quad (1.29)$$

In questo caso il tensore di Green, che abbiamo indicato con  $\tilde{G}_{n\alpha}$  in modo da distinguerlo dal precedente, è calcolato sulla forza impulsiva che agisce nella direzione  $\alpha$ , quella della frattura (*crack*), e costituisce lo spostamento nella direzione  $n$  da essa causato. Ci riferiremo a questo tensore come al tensore di Green dinamico.

$\Sigma(\tau)$  è la superficie fratturata nel tempo  $t = \tau$ ,  $u_n$  è la dislocazione sul piano di faglia,  $\sigma_{\alpha 3}^p$  è la perturbazione allo sforzo iniziale  $\sigma_{\alpha 3}^p$  in direzione  $\alpha$  rispetto alla normale al piano di faglia.

Un modello dinamico si muove nell'ambito della meccanica del continuo, ovvero studia la variabilità delle caratteristiche di un mezzo durante un determinato processo fisico. Si è visto nei paragrafi precedenti che il processo sismogenetico è principalmente determinato dal modo in cui il materiale risponde alla sollecitazione e dalla variazione dell'attrito nel tempo.

Il modello dinamico si ripropone di studiare il comportamento delle forze in gioco proprio sul fronte di rottura, pertanto i criteri di frattura risultano inadeguati allo scopo: il problema sul fronte di rottura, dove in questo caso è la trazione a variare nel tempo, può essere risolto assumendo che il processo di caduta di tensione non avvenga istantaneamente e puntualmente ma su uno spostamento di dimensione finita. La legge che lega la trazione allo spostamento è quindi una legge d'attrito, e prende il nome di '*legge costitutiva*' (Ref: Sholz,1990).

Assegnando la legge costitutiva è quindi possibile risolvere la 1.29 e in questo caso la sua soluzione si dice risolvere un problema *spontaneo*. Una seconda soluzione può essere ottenuta imponendo, oltre alla legge costitutiva, la velocità di rottura sul piano di faglia  $v_r$ , e in questo caso si risolve un problema *non spontaneo*.

Un'ultima soluzione al problema dinamico può essere ottenuta assumendo la velocità di spostamento  $\Delta \vec{u}$  in ogni punto del piano di faglia come condizione al contorno e la distribuzione dello sforzo iniziale, in modo da determinare la variazione della trazione in maniera diretta dal calcolo. In questo modo non è necessario specificare la relazione costitutiva e l'evoluzione della trazione dinamica risulta direttamente dai calcoli. Questo approccio è detto *quasi dinamico*.

In quest'ultimo caso, la trazione può essere determinata solo a partire dalla conoscenza del campo di spostamenti prodotto dall'episodio sismico. A partire da questa informazione è possibile ad esempio determinare la variazione di sforzo indipendentemente dall'assegnazione della legge costitutiva. Infatti la variazione di sforzo può essere stimata dall'inversione della relazione della 1.29 (Madariaga

& Fukuyama, 1998) con la condizione che tutte le variabili siano indipendenti da  $x_2$  :

$$\tau(x, t) = \frac{\mu}{2V_s} \Delta \dot{u}(x, t) + \int_{\Sigma} \int_0^t k(x - \xi; t - t') \Delta \dot{u}(\xi, t') dt' d\Sigma \quad (1.30)$$

ovvero la forma generalizzata dell'espressione che in  $k$  riassume i tre contributi della dislocazione nell'approssimazione di campo lontano e campo vicino. La (1.30) mette in luce la dipendenza della trazione da due termini:

il primo termine rappresenta il contributo locale; il secondo rappresenta quello che si chiama “carico” ovvero il contributo che gli elementi che hanno già rotto e che continuano a dislocare contribuendo alla variazione della trazione sul punto  $x$ .

Nella (1.30) gli integrandi sono rispettivamente:

$\Delta \dot{u}_i$  = velocità di spostamento

$V_s$  = velocità delle onde  $s$

$\mu$  = rigidità

$\Sigma$  = area della faglia

$k$  = è il kernel di integrazione.

### 1.3.3 Complessità della faglia

La resistenza alla deformazione è descritta dal parametro di *strength* (Das e Aki, 1977) che misura la resistenza della roccia alla dislocazione, ed è definita come:

$$S = \frac{\tau_u - \tau_0}{\tau_0 - \tau_f} \quad (1.31)$$

Questo è un parametro usato nella meccanica della frattura classica dove:  $\tau_0$  è pari allo sforzo di taglio iniziale,  $\tau_u$  è il valore di soglia dello sforzo e  $\tau_f$  è lo

sforzo finale, e  $(\tau_0 - \tau_f)$  è definito come ‘*caduta di sforzo dinamica*’ (Figura 1.7).

Da questo parametro dipendono le caratteristiche di propagazione della rottura: Un alto valore dello strength esprime un’alta resistenza alla frattura che, a limite, può portare all’arresto del fronte di rottura. Le zone in cui il valore di strength è alto vengono dette *barriere* (Aki, 1979, Das & Aki, 1977a, 1977b). La barriera è caratterizzata dalla sua estensione e dal valore di  $S$ , e questi due parametri insieme controllano la propagazione spontanea della rottura.

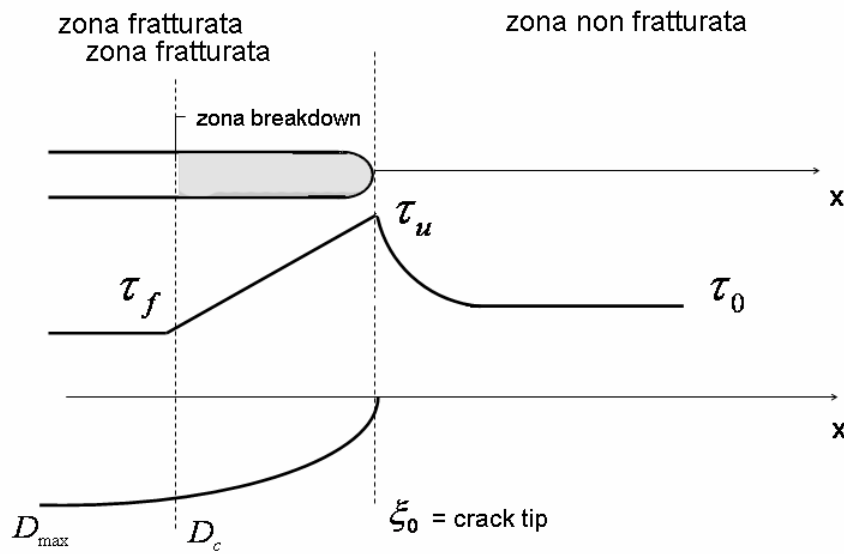
La variabilità dello strength sul piano di faglia rende la faglia eterogenea e ci si riferisce a questa variabilità attraverso il concetto di complessità della faglia.

I forti terremoti lasciano un’impronta visibile della traccia superficiale della faglia, ed insieme alle registrazioni delle onde elastiche, è possibile caratterizzare la sorgente, assegnandole dimensioni e orientazione, e meccanismo focale. Questa traccia spesso si rivela discontinua e irregolare, perché la velocità di rottura dipende da caratteristiche della faglia che non sono omogenee. Questa complessità può anche essere letta nelle registrazioni sismiche, infatti la radiazione sismica presenta diverse forme d’onda complesse e ricche nella componente ad alta frequenza ( $T \sim [0.01 \div 0.1]s$ ), che è quella che contiene le informazioni dinamiche. Questo è indice di una propagazione incoerente della frattura o di eterogeneità nello scorrimento, in poche parole l’inversione delle forme d’onda ci restituisce una sorgente sismica complessa. Questa complessità è dovuta alle eterogeneità del rilascio di sforzo sul piano di faglia, ed a eterogeneità reologiche caratteristiche dei materiali che compongono la faglia.

## **1.4 Le leggi costitutive**

Le leggi costitutive vengono introdotte nello studio dinamico del meccanismo di fagliazione allo scopo di descrivere il comportamento della trazione sul fronte di

rottura, lì dove la frattura crea due zone con condizioni al contorno differenti, che non permettono una soluzione esplicita dell'equazione dell'elastodinamica. Le leggi costitutive rimuovono la singolarità dello sforzo, introducendo una zona dissipativa di dimensione fisica in grado di assorbire l'energia necessaria, detta 'zona coesiva'. Con l'introduzione di tale zona l'andamento della trazione e dello slip sono quelli riportati in figura 1.6.



**Figura 1.6:** Introduzione della zona coesiva, andamento della trazione (parte centrale), andamento dello slip (in basso)

Nell'ambito delle leggi costitutive, alla zona anelastica di deformazione viene attribuita una dimensione finita che giustifichi l'assorbimento dell'energia di frattura. La zona dove avviene il rilascio di sforzo è detta zona di 'breakdown' (Onhaka & Yamashita, 1989).

L'equazione 1.29 può essere riscritta in termini di trazione:

$$u_n(x_1, x_2, t) = P \int_0^t \int_{\Sigma(\tau)} G_{ij}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2, t - \tau) T_j(\xi_1, \xi_2, \tau) d\xi_1 d\xi_2 d\tau \quad (1.32)$$

dove  $T_j = \tau_{ij} n_j$ , ovvero pari alla componente j-ima della trazione sul piano, definita in termini del tensore di sforzo nella direzione j e  $P$  è la parte principale.

La discontinuità dello sforzo sulla faglia determina una singolarità analitica nel calcolo dell'integrale (1.30) sulla superficie  $\Sigma$  di dislocazione; la soluzione può essere completata vincolando la trazione nella zona di breakdown tramite una legge che metta in relazione la trazione e le variabili di stato locali e che risolva il problema del bilanciamento energetico nei processi di fatturazione che coinvolgono l'attrito. Tale legge è la legge costitutiva, che a differenza del criterio di frattura, non solo definisce le condizioni in cui può avvenire la rottura, ma permette di descrivere la dinamica del processo nella zona di deformazione anelastica, quindi di determinare l'andamento della trazione, la velocità di slip, lo slip e l'andamento dei parametri dinamici, quali il rilascio di sforzo.

In generale una relazione costitutiva descrive il comportamento dinamico sulla faglia introducendo una relazione fisica, dipendente dal tempo e dalla posizione, che andando a risolvere la singolarità al crack –tip, non solo descrive le condizioni di instabilità, ma descrive anche il comportamento della trazione dinamica dopo il passaggio del fronte di rottura.

Le leggi costitutive si differenziano principalmente nella capacità di descrivere l'intero ciclo sismico, la descrizione del quale, è affidata al comportamento del campo di resistenza, e alla sua dipendenza dalle variabili di stato locali:

$$S = S(\bar{u}, \dot{\bar{u}}, N, t, \Psi, T, \lambda..)$$

Dove:  $\bar{u}$  è lo slip,  $\dot{\bar{u}}$  la velocità di slip,  $N$  la componente normale dello sforzo,  $t$  il tempo,  $\Psi$  la variabile di stato,  $T$  la temperatura, e  $\lambda$  un parametro che rappresenta le caratteristiche geometriche della faglia (gouge, ruvidità).

La legge costitutiva elimina la singolarità e permette di risolvere la 1.32 ovvero di determinare la soluzione all'equazione del moto. (Aki – Richards, 2002).

Le relazioni costitutive sono di diversi tipi, le più usate sono la legge slip weakening, in cui la trazione è dipendente direttamente dalla dislocazione, la legge rate & state in cui la trazione dipende dalla velocità di slip e da un variabile di stato. Entrambe derivano dalla constatazione teorico-sperimentale che

L'instabilità che origina il processo sismogenetico sia legata alla variazione temporale di una variabile fisica.

#### 1.4.1 La legge slip weakening- SW (Ida 1972, Andrews 1976):

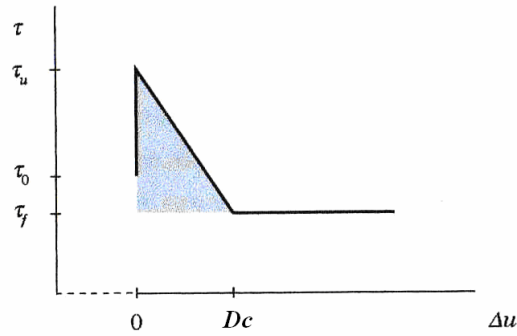
La legge slip weakening risolve la singolarità sul fronte di rottura assegnando ad ogni punto del piano di faglia il valore della tensione massima in funzione dello slip. Il rilascio di sforzo non avviene pertanto in modo brusco in un punto, ma entro una dislocazione caratteristica, detta  $D_c$ , che rappresenta il valore di slip necessario affinché l'assorbimento dell'energia di frattura sia possibile.

Il valore massimo di trazione che il materiale può sopportare è il valore di soglia  $\tau_u$ . Successivamente la tensione diminuisce in funzione della dislocazione, fino a raggiungere il valore costante  $\tau_f$ . L'andamento della trazione in funzione dello slip può essere riassunto come segue:

$$\tau = \begin{cases} \tau_u - (\tau_u - \tau_f) \frac{u}{D_c} & u < D_c \\ \tau_f & u \geq D_c \end{cases} \quad (1.33)$$

Quando  $\tau$  raggiunge il valore  $\tau_u$  la tensione  $T(u)$  decresce linearmente a zero, e la dislocazione  $u$  aumenta. Quando  $u$  ha raggiunto il valore di scorrimento caratteristico  $D_c$  la tensione oscilla intorno al valore costante  $\tau_f$  (attrito cinetico sul piano di faglia). Tale andamento è descritto in Figura 1.7.





**Figura 1.7:** Modello slip – weakening. Andamento della trazione rispetto alla dislocazione (tratta da Andrews, 1976)

L'andamento della trazione sul piano di faglia dipende dalle caratteristiche del mezzo poiché l'instabilità che origina l'evento sismico è legata tanto alla resistenza del mezzo alla frattura quanto alla massima resistenza all'attrito. Nel caso della legge slip weakening tali caratteristiche sono funzione della sola dislocazione e il comportamento è ben descritto dalla legge  $\tau(\Delta u)$ , ovvero dall'evoluzione della trazione in funzione della dislocazione e dei valori del

$$\text{parametro di strength } S = \frac{\tau_u - \tau_0}{\tau_d - \tau_f}.$$

Tale dipendenza rende lo SW inadeguato a descrivere la fase di re-strengthening poiché la sola dislocazione non è in grado di giustificare il processo di riaccumulo dell'energia.

Infatti, l'energia spesa per la creazione della frattura è pressoché costante<sup>3</sup> e nella forma

$$2G = \frac{1}{2}(\tau_u - \tau_f)D_c \quad (1.34)$$

<sup>3</sup> In realtà l'assorbimento di energia è controllato dalla topografia della superficie (Brown & Scholz, 1985). La superficie di contatto è costituita da un insieme di superfici fratturate che possono essere descritte dalla dimensione frattale D, funzione della lunghezza d'onda spaziale. (Ref: Scholz, 1990). Ognuna richiede una diversa energia di superficie pertanto l'energia necessaria a creare la frattura non è realmente costante.

Se la faglia ha proprietà iniziali uniformi, lo sforzo iniziale è uniforme, pertanto una frattura che inizia a propagarsi non è nella condizione energetica di potersi fermare. Lo slip – weakening dunque non produce una descrizione realistica del processo sismogenetico, tuttavia permette di realizzare un modello utile allo studio del processo sul fronte di rottura.

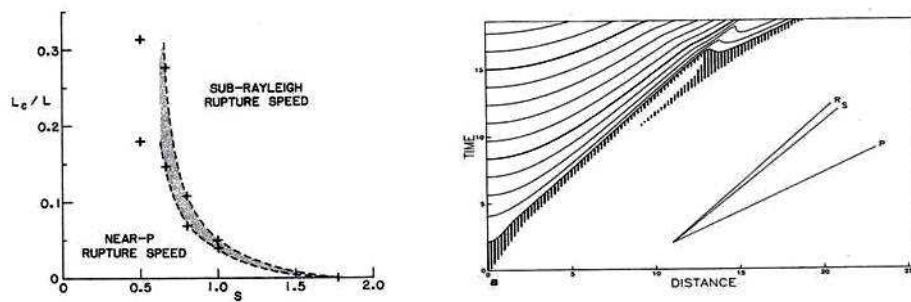
Nell'ipotesi di energia costante, la frattura non può nucleare in un punto, e si assume che abbia origine in una zona la cui dimensione è data dalla lunghezza  $L_c$ :

$$L_c = \frac{8}{\pi} \left(1 - \frac{v_s^2}{v_p^2}\right) \frac{\mu G}{(\tau_0 - \tau_f)^2} \quad (1.35)$$

Che riscritta in termini dei parametri dello slip – weakening è:

$$L_c = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{v_s^2}{v_p^2}\right) \frac{\mu(\tau_0 - \tau_f)}{(\tau_0 - \tau_f)^2} D_c \quad (1.36)$$

Poiché la zona coesiva si riduce con la crescita della frattura (Ida, 1972), la velocità di rottura varia in base alle caratteristiche della faglia, ovvero in base al parametro di strength e al rapporto  $L/L_c$ , tra la distanza di propagazione e la distanza critica (Ref: Andrews, 1985).



**Figura 1.8:**a) Campo delle velocità di rottura di una frattura planare in funzione dello strength e del rapporto tra distanza di propagazione e distanza critica. La regione tratteggiata è quella di transizione. b) andamento dello slip durante la propagazione della frattura. (tratta da Scholz)

Il risultato è riportato in Figura 1.8: Per determinati valori di questi parametri il fronte di rottura può superare la velocità delle onde S (Fig 1.8 a sinistra)<sup>4</sup> e raggiungere valori molto vicini alla velocità delle onde P (zona ‘near P rupture speed’). Oppure può verificarsi che il fronte si propaghi ad una velocità inferiore a quella delle onde di Rayleigh (zona ‘sub- Rayleigh rupture speed’). Nel caso il fronte si propaghi con velocità supershear il fronte si biforca (*comportamento strong seismic*), in una zona detta zona di transizione. Parte del fronte si propaga con velocità inferiore a quella delle onde di Rayleigh, parte con velocità vicina a quella delle onde – P (Fig. 1.8 a destra) .

Il valore dello strength determina il tipo di sforzo che genera la frattura: se lo strength non consente un incremento della trazione maggiore di 1.77 volte lo sforzo drop allora la velocità di rottura sarà più alta di quella di Rayleigh. Se  $S = 0$  allora la velocità sarà quella delle onde P (Burridge, 1973).

#### 1.4.2 La legge rate and state -R&S (Dieterich 1986, Ruina 1983):

Il termine Rate si riferisce alla dipendenza del coefficiente di attrito dalla velocità di dislocazione, mentre il termine State si riferisce alla dipendenza dallo stato interno del sistema, e quindi dalla sua storia.

La formulazione di tale legge è dovuta al tentativo di riprodurre gli andamenti ottenuti in laboratorio che rivelano una dipendenza esplicita dal tempo e manifestano un meccanismo di memoria.

Gli esperimenti di laboratorio mostrano una dipendenza della trazione del tipo:

$$\tau = \sigma_n^{eff} \mu(t) \quad (1.37)$$

---

<sup>4</sup> Se  $S > 1.77$  il limite della velocità di rottura è quello delle onde di Rayleigh. Se  $S < 1.77$ , dopo una certa distanza percorsa dal crack tip, la zona coesiva è ridotta, la singolarità è rimossa, la velocità è molto maggiore di quella delle onde – S (*‘supershear velocity’*), nel limite, può raggiungere la velocità delle onde – P.

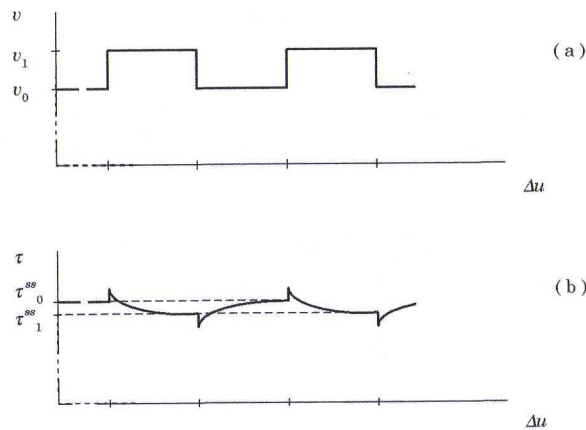
dove  $\sigma_n^{eff} = \sigma_n - P_f$  in cui  $\sigma_n$  è lo sforzo normale e  $P_f$  la pressione dei fluidi e

$$\mu = \mu_* + a \ln\left(\frac{V}{V_*}\right) + b \ln\left(\frac{V_* \theta}{L}\right) \quad (1.38)$$

Dove  $\mu_*$  è un coefficiente di attrito nominale di riferimento,  $V$  è il valore della velocità di dislocazione e  $V_*$  è il suo valore di riferimento; 'a' è la sensibilità alla variazione di velocità, ovvero la risposta diretta dell'attrito al salto di velocità; 'b' controlla l'alterazione graduale della forza sulla distanza caratteristica di scorrimento  $L$  che segue il salto di velocità.

' $\theta$ ' è una variabile che rappresenta lo stato di contatto delle superfici di scorrimento, o una struttura interna della faglia. La sua dipendenza dal tempo rappresenta una memoria del sistema. (Figura 1.9)

La relazione costitutiva Rate & State descrive bene il comportamento stick slip osservato per i processi controllati dall'attrito. La fase di re-strengthening è una conseguenza diretta della memoria del sistema che ricorda come è evoluto il suo stato dalla condizione finale a quella iniziale.



**Figura 1.9:** effetti della variazione della velocità. a) Andamento della velocità in funzione dello scorrimento. b) comportamento dell'attrito.

Gli esperimenti allo Spring Slider mostrano che nella fase di ricarica e scarica ripetute, l'attrito dipende dalla velocità di dislocazione, e il sistema sembra avere memoria dello stato raggiunto durante la dislocazione critica, le caratteristiche dell'andamento dell'attrito in relazione allo scorrimento sono riassumibili come segue (Figura 1.9):

*effetto diretto*: una variazione nel valore della velocità provoca un cambiamento istantaneo dell'attrito

*effetto a lungo termine*: una lenta variazione dell'attrito in senso opposto alla variazione della velocità.

*Slip critico*: La variazione del valore d'attrito non avviene istantaneamente ma dopo un tempo finito (Rabinowicz, 1951, 1958): durante questo tempo la faglia disloca di un tratto  $L$ , lunghezza caratteristica.

*effetto stazionario*: dopo l'instabilità, l'attrito ritorna ad una situazione stabile e oscilla intorno ad un valore costante.

Questa legge sperimentale introduce una variabile di stato in grado di modellare il meccanismo stick slip conferendo alla resistenza all'attrito una dipendenza dal tempo.

La funzione di stato non ha una dipendenza esplicita dalle coordinate spaziali perciò esclude fenomeni di diffusione dello stato della faglia, e la sua dipendenza dal tempo le conferisce caratteristiche di memoria del precedente scorrimento.

### **1.4.3 Confronto tra legge SW e R&S**

E' stato dimostrato da studi teorici (Ida, 1972; Andrews, 1976; Day, 1982; Ohnaka and Yamashita, 1989; Matsu'ura et al., 1992; Fukuyama and Madariaga, 1998; Madariaga et al., 1998; Shibazaki and Matsu'ura, 1998), e da esperimenti di laboratorio (Dieterich, 1981; Okubo and Dieterich, 1984, Ohnaka and Kuwahara, 1990; Ohnaka and Shen, 1999) che le relazioni costitutive, in

particolare lo SW , giocano un ruolo fondamentale nel processo dinamico di rottura, e nel moto del suolo durante i forti terremoti e che l'andamento della trazione in funzione dello slip è fortemente condizionata dalla scelta dei parametri costitutivi, (ad esempio la fase di slip hardening può essere del tutto assente per un particolare set di parametri) (Bizzarri & Cocco, 2003).

Entrambe le leggi descrivono la propagazione dinamica della rottura e implicano la dipendenza della trazione dallo slip. Descrivono in modo simile la fase di propagazione del processo dinamico di fatturazione, ma sono molto diverse nella descrizione della fase d'arresto. La nucleazione, nel caso della legge SW è forzata dall'assegnazione di una velocità di scorrimento, o da un parametro di strength. Nel caso della R&S l'iniziazione della rottura è legata alle condizioni iniziali sulla faglia, quindi alla sua storia, ed è prodotta assegnando un valore della variabile di stato.

La fase di propagazione è descritta in entrambi i casi dalla crescita spontanea della velocità caratterizzata da una zona di transizione. Nel caso della SW la creazione di tale zona è associata alla variabilità del parametro di strength sul piano di faglia, mentre nel caso R&S è associata alla relazione tra i parametri costitutivi  $a$ ,  $b$  e  $L$ .

La differenza principale è nella fase di arresto: la legge R & S nella formulazione di Dietrich e Ruina non include l'arresto ma è possibile modificare la legge di evoluzione per ottenere tale comportamento; la curva slip – weakening, al contrario, non presenta fase di cicatrizzazione. Diverse teorie sono atte a spiegare tale comportamento:

si assume (Das & Aki, 1977; Papageorgiou, & Aki, 1983) che la dislocazione continui finché l'onda riflessa dai bordi della zona di frattura non si sovrappone allo scorrimento, portando l'informazione di arresto. Nel caso di faglia infinitamente estesa tale informazione non può raggiungere la dislocazione e la faglia non cicatrizza.

Heaton (1990), propone una dipendenza della relazione di Andrews dalla velocità di scorrimento:

$$\tau_f = \tau_u - h\dot{u}$$

dove  $h$  è una costante del materiale.

In questo modo egli introduce una variazione dell'attrito nella legge costitutiva in grado di descrivere la fase di cicatrizzazione, poiché quando la velocità di scorrimento diminuisce a zero, l'attrito dinamico tende al valore dell'attrito statico e in  $\tau_f = \tau_u$  la faglia può rompere nuovamente.

La differenza fondamentale sta nella descrizione della fase di re-strengthening, ovvero nella fase inter- sismica (periodo tra due eventi sismici sulla stessa faglia), di riguadagno dell'energia. Le leggi d'attrito dipendenti dallo stato e dalla velocità, poiché dipendenti da funzioni variabili nel tempo, giustificano il meccanismo di riguadagno della resistenza, non modellabile nella descrizione SW, dipendente dalla sola dislocazione.

## **1.5 Caratterizzazione del piano di faglia**

Il piano di faglia è caratterizzato dalla direzione del vettore normale. La direzione dello scorrimento è data dal vettore di dislocazione ('*slip*'), che rappresenta la discontinuità del campo degli spostamenti, ovvero la differenza del vettore di spostamento sui due lembi della faglia. Esso rappresenta la direzione in cui la parte superiore della faglia si muove rispetto a quella inferiore. Poiché il vettore di *slip* è nel piano di faglia esso è ortogonale al vettore normale.

L'orientazione del piano di faglia rispetto alla superficie terrestre è definita dai seguenti parametri: lo 'strike', che dà l'orientazione del piano di faglia rispetto ad un riferimento geografico, ovvero l'angolo, misurato in senso orario, a partire dal nord terrestre; il 'dip', che misura l'immersione del piano di faglia rispetto alla superficie terrestre; Il 'rake', che dà direzione di scorrimento della parte superiore

della faglia rispetto a quella inferiore, ed è misurato in senso antiorario a partire dalla traccia di intersezione tra piano di faglia e superficie terrestre (Figura 1.10).

È perciò possibile assegnare un sistema di coordinate e descrivere il tipo di scorrimento una volta assegnato un sistema di assi di riferimento.

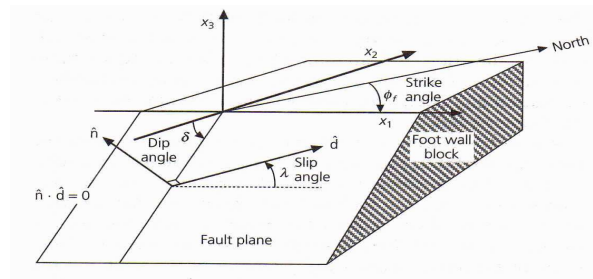


Figura 1.10: Caratterizzazione della sorgente (tratto da Stein, 2003)

### 1.5.1 Sforzi principali e orientazione della faglia

La valutazione di un criterio di frattura, o di una legge costitutiva richiede la conoscenza dello stato iniziale di sforzo nella crosta. Anderson (1905,1955) propone che lo stato di sforzo può essere totalmente descritto dalle sue componenti principali, ovvero dagli autovettori del tensore di sforzo che rappresentano le componenti dello sforzo normale nelle tre direzioni ortogonali. Le componenti principali dello sforzo ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) determinano il tipo di dislocazione sulla faglia e la sua direzione. Assumendo che uno degli assi principali sia verticale è possibile descrivere il meccanismo di fagliazione in base alle componenti principali sul piano ad esso ortogonale. In questo caso ci si aspetta che quando sull'asse verticale la tensione è massima, sul piano perpendicolare a tale asse si esercitino la componente di massimo e di minimo sforzo, e che pertanto la dislocazione si accomodi sulla componente orizzontale. Quando sulla faglia agiscono sia la componente di massimo che quella di minimo sforzo la dislocazione avviene con un meccanismo detto '*strike slip faulting*' e in

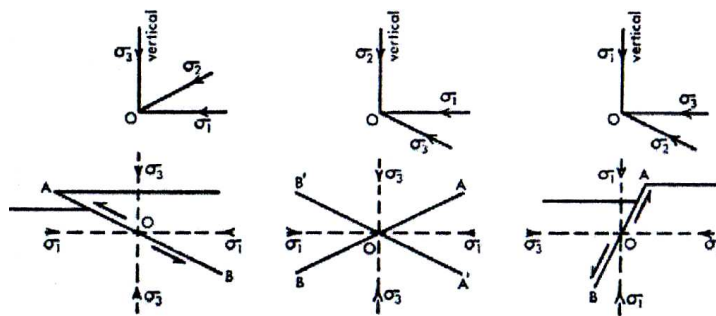


questo caso sulla verticale si esercita lo sforzo principale intermedio ( $\sigma_2$ ). Una faglia che sull'asse verticale abbia lo sforzo principale minimo ( $\sigma_3$ ), ha un meccanismo di fagliazione inverso, detto '*thrust faulting*', di tipo compressivo su entrambe le direzioni. Quando lo sforzo principale massimo ( $\sigma_1$ ) è sulla verticale, allora il moto è di tipo distensivo sulle due componenti e il meccanismo di fagliazione è normale, '*normal faulting*' (Figura 1.11).

La componente normale dello sforzo è legata alla componente tangenziale dalla legge di Amonton:

$$\tau = \mu \sigma$$

dove  $\mu$  è il coefficiente di attrito.



**Figura 1.11:** da sinistra, thrust faulting, strike-slip faulting, normal faulting

Come visto nei paragrafi precedenti il valore dell'attrito determina necessariamente l'andamento della trazione nel tempo e in relazione allo slip. Pertanto la sua valutazione è di fondamentale importanza.

## Capitolo 2

### Modelli quasi dinamici per vincolare la trazione sul piano di faglia

Lo scopo di questa tesi è quello di determinare l'evoluzione della trazione sul piano di faglia, ovvero quello di descrivere l'evoluzione del sistema simogenetico e dei parametri fisici che governano il processo di rottura di forti eventi recenti. A questo scopo in questo capitolo mostriamo come poter risolvere il problema dinamico, ovvero come determinare una soluzione dell'equazione dell'elastodinamica, a partire dal modello di sorgente fornito dall'inversione dei dati geofisici mediante i modelli cinematici.

La simulazione della propagazione spontanea di una frattura '*cosismica*' attraverso la soluzione dell'equazione dell'elastodinamica richiede una condizione al contorno che vincoli la trazione nella zona coesiva, in modo da risolvere il bilanciamento energetico in presenza di forze dissipative e per eliminare la singolarità dello sforzo al crack tip. Come descritto più in dettaglio al capitolo 1, tale condizione è rappresentata da una legge costitutiva che lega la trazione dinamica ad altri parametri fisici.

Una prima possibilità quindi di ricavare il modello dinamico consiste in un metodo detto '*metodo diretto spontaneo*', in cui l'evoluzione della trazione sul piano di faglia è vincolata assumendo una legge costitutiva

Quando si cerca di riprodurre un terremoto reale, la difficoltà principale consiste nell'assegnazione di parametri dinamici sul piano di faglia (che dipendono dalla legge costitutiva scelta), quali, nel caso della legge slip weakening ad esempio: il valore dello stress iniziale, la resistenza dinamica e statica all'attrito e il valore di slip critico  $D_c$ .

Una seconda soluzione, come accennato nel capitolo 1, può essere ottenuta assegnando la velocità di spostamento sul piano di faglia come condizione al contorno del problema. In questo modo è possibile determinare il comportamento dell'evoluzione della trazione nella zona coesiva come soluzione dell'equazione dell'elastodinamica e verificare quindi gli andamenti delle relazioni costitutive. Questo approccio è detto '*metodo quasi dinamico*'.

In questo capitolo presentiamo tale metodo e lo applicheremo a terremoti reali allo scopo di ricavare i valori dei principali parametri dinamici di tali eventi.

## ***2.1 I modelli cinematici di sorgente***

I modelli di rottura cinematici sono ricavati dall'inversione delle forme d'onda del moto del suolo con diversi tipi di tecniche ben conosciute in letteratura. (Hartzell & Heaton, 1983; Fukujama & Itikura, 1986; Takeo, 1987; Beroza & Spudich, 1988; Yoshida & Koketsu, 2000; Wald & Heaton, 1994; Yoshida et al., 1996; Cotton & Campillo, 1995; e altri).

Il modello di sorgente può essere ricostruito attraverso l'informazione contenuta nella misura della deformazione del suolo (GPS, SAR) e nella registrazione delle onde sismiche. I dati su cui vengono fatte le inversioni cinematiche sono: i dati telesismici, ovvero le registrazioni dei terremoti (sismogrammi) effettuate su scala globale, i dati che derivano da strumenti a larga banda (broad band) e i dati che derivano da accelerometri (strong ground motion), che raccolgono le informazioni locali e regionali e il *GPS, global positioning system displacement vectors* che fornisce informazioni sul campo di deformazioni che si produce a seguito di un terremoto. Questi dati si differenziano principalmente per la banda di frequenza

in cui possono essere utilizzati; in particolare il GPS fornisce informazioni di tipo statico e quindi a frequenza zero. I dati telesismici vengono generalmente utilizzati per distanze maggiori di 600 km dalla sorgente, i dati broad band per una distanza compresa tra [50,500] km, i dati strong motion per distanze <100 km. L'uso dei dati sismici e geodetici in combinazione fornisce un'interpretazione più completa del meccanismo alla base dell'evento sismico. Ad esempio nell'interpretazione del meccanismo focale, tramite la lettura della registrazione dell'onda sismica, nasce un'ambiguità nella distinzione tra piano focale e piano ausiliario<sup>1</sup>; i dati geodetici sono fondamentali per risolvere quest'ambiguità. Entrambi forniscono la dislocazione sul piano di faglia ma mentre i dati geodetici dipendono dallo spostamento relativo dei punti della faglia prima e dopo il terremoto i dati sismici danno informazioni su quanto avviene durante la propagazione della rottura.

Wald & Heaton (per Northridge 1994) mostrano che l'uso combinato dei due strumenti permette di coprire il contributo del campo vicino, estendendo il dominio delle frequenze fino ad 1.0 Hz e permettendo il confronto tra modelli di slip cosismico a diverse frequenze. Inoltre i dati sismici dipendono dall'intervallo di campionamento mentre un modello geodetico ne è indipendente, pertanto quest'ultimo può essere usato per vincolare offset statico nell'inversione delle forme d'onda.

Il punto di partenza dell'elaborazione cinematica è il teorema di rappresentazione attraverso il quale, con opportune condizioni al contorno, è possibile esprimere il comportamento dello spostamento in un punto qualunque, ad esempio sulla superficie terrestre, a partire dalla dislocazione assunta sul piano di faglia.

Riportiamo di seguito per completezza l'equazione (1.28):

$$u_i(\vec{x}, t) = \int_{\Sigma} d\tau \int C_{ijkl} G_{nk,l} \Delta u_i n_j dS \quad (2.1)$$

---

<sup>1</sup> La dislocazione è prodotta da un sistema di forze che è equivalente a quella prodotta da una sorgente di doppia coppia di forze. Quest'ultima permette lo scorrimento su due piani, quello principale e quello ausiliario. Il radiation pattern permette di descrivere il meccanismo focale in termini di direzione di scorrimento ma lascia indeterminato il piano.

Questa equazione è utilizzata sia per procedure cinematiche dirette che inverse. In una modellazione diretta, si assume la dislocazione sul piano di faglia  $[\Delta \vec{u}_i(\xi, t)]$  e si calcolano i sismogrammi sintetici nelle stazioni di interesse. In una modellazione inversa, dato un modello di partenza di dislocazione  $\Delta \vec{u}_0(\xi, t)$ , si cerca il modello che ottiene il miglior accordo tra i sismogrammi sintetici e i sismogrammi osservati attraverso un processo iterativo (che dipenderà dalla tecnica di inversione utilizzata). Tale metodo permette di determinare il modello di sorgente a partire dall'informazione contenuta nel sismogramma registrato.

Il modello cinematico produce delle informazioni indispensabili per la determinazione dell'evoluzione del sistema, poiché permette di descrivere l'andamento temporale della dislocazione e le caratteristiche principali della sorgente.

Nella (2.1), la storia temporale della dislocazione dipende dalla funzione che descrive l'evoluzione della velocità di slip durante la propagazione della rottura sul piano di faglia, chiamata '*Source Time Function (STF)*', attraverso la quale  $\Delta \vec{u}_i$  può essere scritta come:

$$\Delta \dot{u}_i(\vec{\xi}, t) = \dot{f}(t - t_r(\vec{\xi})) \cdot \Delta u(\vec{\xi}) \quad (2.2)$$

Dove  $\vec{\xi} = (\xi_1, \xi_2)$  rappresenta le coordinate locali del piano di faglia,  $t_r(\vec{\xi})$  è il tempo di rottura, la funzione normalizzata  $\dot{f}(t)$  è detta '*Slip Velocity Function (SVF)*', o anche *Source Time Function (STF)* e descrive l'andamento temporale della velocità di dislocazione. In essa sono contenuti i parametri che definiscono la modalità con cui ogni sottofaglia disloca, quindi anche il rise time, ovvero la durata della dislocazione per ogni sottofaglia, il picco di velocità. La STF è scelta a priori dal modellatore, in modo da rappresentare al meglio la condizione di rottura; in letteratura ritroviamo funzioni triangolari semplici, oppure di funzioni analitiche più elaborate come quella di Kostrov o funzioni gaussiane (Figura 2.1).

La forma della funzione di velocità di slip è pertanto scelta a priori, mentre i tempi di rottura, il rise time (durata della dislocazione) e l'ampiezza di slip variano da nodo a nodo e vengono ricavati dall'inversione.

La distribuzione sul piano di faglia di questi parametri caratterizza la dislocazione  $\Delta \vec{u}(\xi, t)$  e ugualmente la sua derivata  $\Delta \vec{\dot{u}}_i(\xi, t)$ . La funzione dislocazione è costruita dal modellatore suddividendo l'area della faglia in una serie di sottofaglie in cui viene assegnata l'evoluzione temporale della rottura. La densità di questi punti (parametrizzazione del piano di faglia) dipende dalla risoluzione disponibile nella procedura numerica determinata dai dati disponibili.

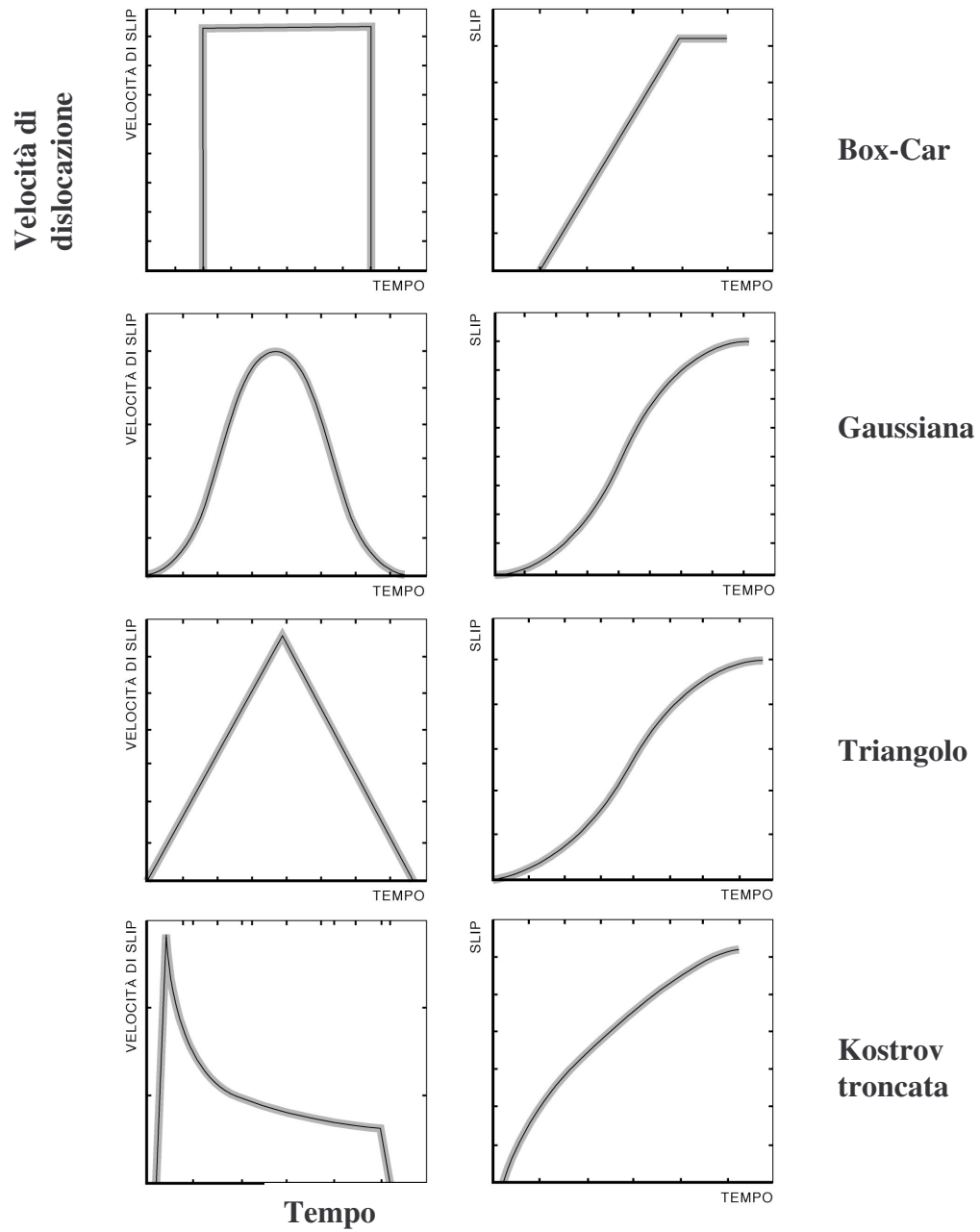


Figura 2.1: A sinistra la velocità di slip e a destra la corrispondente funzione di slip.

## 2.2 Metodo quasi dinamico

Il problema della determinazione dell'evoluzione della trazione sul piano di faglia è legato alla ricerca di una soluzione dell'equazione dell'elastodinamica.

Fukuyama e Madariaga (1998) partendo dall'equazione dell'elastodinamica esplicitano il termine della trazione sul piano di faglia attraverso la seguente equazione:

$$\tau_i(\vec{x}, t) = \frac{\mu}{2V_s} \Delta \dot{u}_i(\vec{x}, t) + \int_{\Sigma} \int_0^t k(\vec{x} - \vec{\xi}; t - t') \Delta \dot{u}_i(\vec{\xi}, t) dt' d\Sigma \quad (2.3)$$

Dove  $\Delta \dot{u}_i$  rappresenta la velocità di slip,  $V_s$  la velocità delle onde S,  $\mu$  la rigidità,  $k$  il carico generato dalle sottofaglie che all'istante di tempo  $t$  stanno ancora dislocando, ovvero un termine che rappresenta il contributo dell'area di faglia che sta dislocando.

Quindi da questa espressione la trazione totale in una sottofaglia risulta costituita di due contributi: quello istantaneo dovuto alla dislocazione locale (il primo termine a secondo membro) e il carico dinamico dovuto alla storia dello slip (il termine integrale a secondo membro).

Questa equazione deriva da soluzioni di continuità e di simmetria degli sforzi e dello slip attraverso la faglia. Essa può essere risolta una volta assunta la velocità di slip e quindi la storia della rottura, e può quindi vincolare la relazione costitutiva per la determinazione della dinamica della rottura.

Il metodo descritto è il metodo '*quasi dinamico*' che utilizza le informazioni ottenute dall'inversione dei modelli cinematici, ovvero la distribuzione spaziale e temporale della velocità di slip, per la determinazione della trazione sul piano di faglia.



Questo metodo permette di caratterizzare il problema dinamico senza la necessità di introdurre ulteriori variabili imponendo come vincolo la velocità di dislocazione prodotta dai modelli cinematici. Le funzioni utilizzate dal modellatore per la descrizione dell'evoluzione temporale della dislocazione, nei modelli cinematici, hanno lo scopo di riprodurre il meccanismo di rottura nel modo più consistente con l'andamento osservato nei modelli dinamici spontanei o osservato negli esperimenti di laboratorio. Una funzione troncata di Kostrov, ad esempio, simula il processo di rottura nella sua completezza, dalla fase di iniziazione alla fase di arresto (riferendoci all'andamento locale, ovvero alla singola sottofaglia), eppure ha lo svantaggio di essere una funzione singolare. Tuttavia alle volte le funzioni sorgente sono scelte senza un vero e proprio significato fisico associato alla caduta di sforzo, queste funzioni sono ad esempio la box o la funzione delta.

Piatanesi et al. (2004) dimostrano che la scelta della STF nel modello influisce sulla stima dei parametri dinamici, calcolati dagli algoritmi numerici che usano la velocità come condizione al contorno e mostrano come più modelli dinamici possano essere associati a una stessa distribuzione di slip. Essi mostrano come la SFT scelta possa fortemente vincolare la trazione alla dislocazione nella zona coesiva. Per questo motivo, nei prossimi capitoli ci soffermeremo a descrivere nel dettaglio le caratteristiche principali dell'evoluzione della trazione per i diversi terremoti modellati e gli effetti delle diverse source time function utilizzate dai diversi modellatori.

### **2.2.1 Tecniche di calcolo numerico**

La modellazione di fratture di taglio viene effettuata attraverso tecniche di calcolo numerico. Le tecniche solitamente utilizzate in letteratura si dividono in due gruppi: i metodi alle differenze finite e i metodi boundary integral che si differenziano principalmente nel metodo di integrazione scelto.

Ci soffermiamo brevemente a descriverle, con particolare attenzione al metodo delle differenze finite, poiché è quello di cui faremo uso nel nostro lavoro.

Nella descrizione del modello boundary integral facciamo riferimento al lavoro di Andrews (1985) che risolve un'equazione integrale del tipo:

$$u_n(x_1, x_2, t) = \int_0^t d\tau \int_{\Sigma(\tau)} \tilde{G}_{n\alpha}(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2, t - \tau) \sigma_{\alpha 3}^p dS \quad (2.4)$$

per fratture di taglio in-plane in cui lo spostamento e la trazione dipendono da una coordinata spaziale (modello 2-D) e dal tempo. Tale equazione viene risolta discretizzando il piano  $(\vec{x}-t)$  in celle di lunghezza  $\Delta x$  (direzione spaziale) e  $\Delta t$  (dimensione temporale). Si assume che tutte le variabili siano indipendenti da  $x_2$  e si discretizza il kernel dell'integrale, in modo da sostituire all'operazione integrale un'operazione di somma sulla griglia. Si ottiene così un'equazione matriciale che può essere risolta con opportune condizioni al contorno nella forma:

$$u_1(j, m) - CT_i(j, m) = \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} F_{11}(k, n) T_1^p(j - k, m - n) \quad (2.5)$$

Dove  $j$  è la coordinata spaziale discretizzata,  $m$  è la coordinata temporale discretizzata e  $F_{11}(k, n)$  rappresenta la funzione di Green discretizzata. Il secondo termine a primo membro nella 2.5 rappresenta il contributo istantaneo dello spostamento nel punto  $j$  all'istante  $m$ ; il secondo membro rappresenta invece il contributo alla dislocazione nel punto  $j$  all'istante  $m$  dovuto a tutti punti che hanno subito dislocazione e che agiscono su di esso come un carico dinamico aggiuntivo.

In particolare la condizione che riguarda il processo di fagliazione è che la componente parallela della dislocazione sia nulla fuori dalla zona di rottura; in questo modo la trazione può essere ricavata nella zona esterna al crack a partire dalla conoscenza del valore della trazione nella zona interna. L'identificazione

delle due zone risulta legata alla conoscenza della posizione del crack tip come funzione del tempo, e pertanto tale funzione deve essere nota a priori (Das e Aki, 1997).

Il metodo alle differenze finite consiste nel discretizzare il dominio di integrazione con una griglia regolare di nodi, e sostituire le derivate dell'equazione differenziale con opportuni rapporti incrementali valutati su tale griglia. Attraverso la discretizzazione l'equazione differenziale si traduce in un sistema di equazioni differenziali per ogni punto (nodo) della griglia, in cui le condizioni iniziali saranno assegnate sul primo e sull'ultimo nodo. Si risolve il sistema di equazioni discretizzate:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{u}_1 &= \frac{\partial}{\partial x_1} \Sigma_{11} + \frac{\partial}{\partial x_2} \Sigma_{12} \\ \rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{u}_2 &= \frac{\partial}{\partial x_1} \Sigma_{12} + \frac{\partial}{\partial x_2} \Sigma_{22}\end{aligned}\tag{2.6}$$

In cui la condizione iniziale è data dal campo di stress presente prima e dopo la rottura.

Nella (2.6)  $\dot{u}$  è la derivata temporale dello slip e  $\Sigma_{ij}$  sono le componenti del tensore degli sforzi.

Collocando in modo opportuno le componenti della velocità dello slip e le componenti della trazione sulla griglia è possibile risolvere le (2.5) su tutto il piano calcolando la variazione delle componenti da uno step al successivo, e le equazioni (2.6) diventano:

$$\begin{aligned}\dot{u}_1^{n+1/2} &= \dot{u}_1^{n+1/2} + f_1^n \Delta t / \rho \\ \dot{u}_2^{n+1/2} &= \dot{u}_2^{n+1/2} + f_2^n \Delta t / \rho\end{aligned}\tag{2.7}$$

Se si assume che tutti i nodi della griglia di integrazione del piano di faglia siano soggetti alle leggi dell'elastodinamica, ad esclusione di quelli sulla linea di frattura, essi sono vincolati l'uno all'altro dalla legge costitutiva, e forzati a muoversi a causa della sollecitazione prodotta dalle forze agenti su ogni nodo. La scansione temporale (discreta) è ottenuta ricalcolando su ogni nodo le forze, che variano con la velocità di slip e a causa dell'interazione reciproca dei nodi adiacenti. Imponendo la velocità di slip, come condizione al contorno, siamo pertanto in grado di determinare l'evoluzione temporale dello stress nella zona coesiva.

Un'altra possibilità, è legata all'assegnazione di una legge costitutiva che descriva il comportamento della trazione sulla superficie di discontinuità.

Mentre in questo secondo caso, la legge viene imposta a priori, nel primo caso questa legge è un risultato diretto dei calcoli.

Il metodo che presentiamo in questo lavoro si avvale della seconda strada, poiché l'obiettivo proposto è quello di determinare l'evoluzione della trazione sul piano di faglia senza imporre una legge costitutiva a priori (Tinti et al. 2005).

Rimandiamo all'Appendice A per un approfondimento del metodo alle differenze finite.

Una prima differenza quindi tra i due metodi nasce proprio dalla scelta del dominio di integrazione: Il boundary integral estende alla regione esterna la crack una soluzione trovata sulla zona coesiva, e pertanto risulta essere un mezzo efficace per la descrizione della processo di rottura dalla fase di accelerazione alla fase di propagazione dinamica vera e propria. Il metodo alle differenze finite, poiché discrezza interamente il piano di faglia, permette di descrivere in modo efficace il comportamento della rottura anche su faglie eterogenee, ed eventualmente non planari.

## 2.3 Dati sperimentali utilizzati

Un codice alle differenze finite discretizza il piano di faglia per la determinazione della soluzione numerica su ogni nodo. La discretizzazione scelta deve essere sufficientemente fine per permettere una buona risoluzione della zona di breakdown (caduta della trazione), ma in ogni caso non riesce a risolvere funzioni discontinue e singolari. Pertanto il codice utilizzato richiede funzioni derivabili e continue ed una risoluzione migliore di quella derivante dai modelli di rottura cinematica.

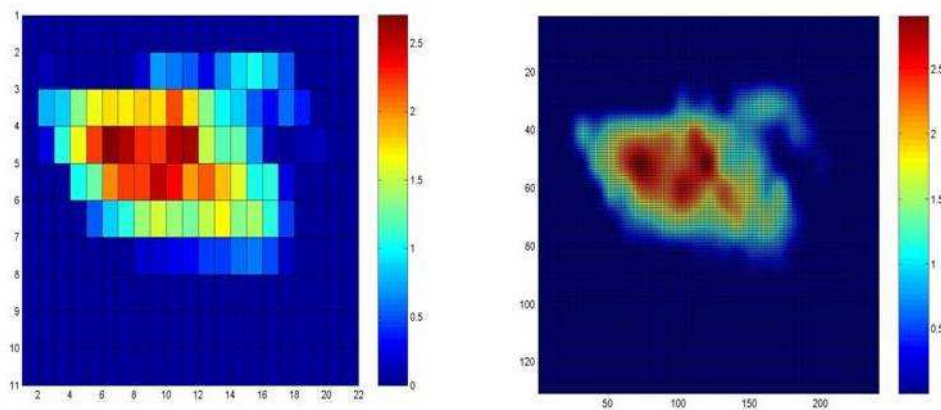
Per poter utilizzare un modello cinematico di sorgente nel codice alle differenze finite è necessario quindi effettuare un'operazione di interpolazione spaziotemporale che ne preservi le caratteristiche originali. L'interpolazione spaziale dello slip sul piano di faglia viene eseguita con la condizione di conservare il momento sismico. Poiché il momento sismico assegnato per ogni sottofaglia dipende dalla superficie e quindi dall'elemento di discretizzazione, durante l'interpolazione della sottofaglia lo slip viene attribuito con un processo iterativo allo scopo di preservare il momento sismico della sottofaglia originale.

Pertanto, detta  $u(x_i)$  la componente di slip originale, la componente dello slip sul nuovo grigliato viene scelta in modo da soddisfare la seguente relazione:

$$u'(x_i) = u(x_i) * \frac{M_i^k}{M_i^l} \quad (2.8)$$

dove  $M_i^l$  è il momento calcolato sulla griglia densa,  $M_i^k$  è il momento originale,  $u(x_i)$  è la componente di slip originale nella sottofaglia  $i$ -ima, e  $u'(x_i)$  la componente modificata, valutata nella medesima sottofaglia  $i$ . Quindi si procede all'interpolazione e con un processo iterativo si cerca la condizione di convergenza che stabilisce il rapporto che meglio approssima la situazione originale (Tinti et al., 2005)

Questa procedura ‘sposta’ il valore dello slip rispetto al modello originale e la distribuzione dello slip risulta leggermente diversa; il valore che si conserva è il momento sismico assegnato alla sottofaglia dal modello cinematico.



**Figura 2.2:** Effetto della procedura di interpolazione. Caso di San Simeon (2003). La richiesta della conservazione del momento sismico sposta il valore dello slip massimo. A sinistra la distribuzione dello slip nel modello originale. A destra il modello interpolato.

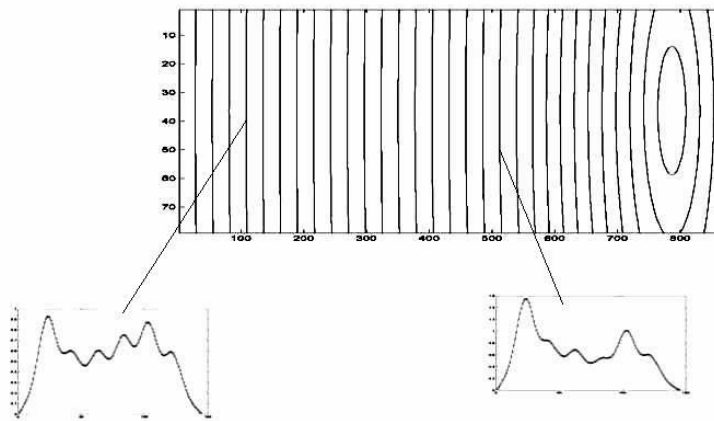
L'interpolazione non introduce nuove informazioni sulle caratteristiche della faglia, ad esempio non definisce in maggior dettaglio le eterogeneità, ma ha il solo scopo di rendere possibile l'elaborazione della velocità di slip con il codice alle differenze finite.

Si tiene conto dei problemi al limite della discretizzazione aggiungendo, al contorno della faglia esistente, delle sottofaglie con dislocazione nulla (4 righe e quattro colonne). Quando si parla di problemi di discretizzazione, ci si riferisce alle discontinuità introdotte ai margini della faglia in un mezzo fisicamente continuo, e ai problemi di riflessione introdotti nella simulazione ai bordi del volume modellato. Infatti le onde sismiche si riflettono come le onde elettromagnetiche e, in presenza di una discontinuità, potrebbero riflettersi sulla discontinuità e perturbare il sistema. Andando ad aggiungere sottofaglie di slip zero, si ottiene una faglia di dimensioni maggiori, e in questo caso un fenomeno di riflessione andrebbe a verificarsi in tempi maggiori dell'evento stesso di rottura non intervenendo quindi nella simulazione.

Il comportamento della rottura è descritto dalla STF; essa può descrivere l'andamento della dislocazione nel tempo in una o più finestre temporali.

Nel primo caso, si assume che il punto possa dislocare una sola volta partire dall'istante  $t_r$  in cui è raggiunto dal fronte, la funzione che descrive l'evoluzione dello slip è data in forma analitica e viene assegnata in tutti i punti della faglia ogni volta che ha inizio una nuova rottura.

Nel secondo caso, vengono usate più funzioni della stessa natura, in base all'assunto che un punto possa dislocare più volte e in modo eterogeneo nel corso dell'evento. Tale comportamento è descritto da funzioni che 'partono' in successione, separate da un certo intervallo di tempo (figura 2.3) ed è possibile approssimare le variazioni spaziali nella durata dello slip e le perturbazioni alla velocità di rottura assegnata. (Ref: Wald & Heaton, 1996) .



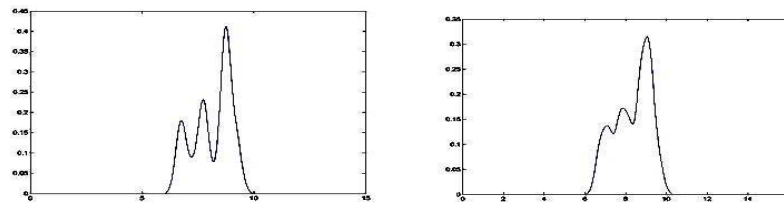
**Figura 2.3:** Esempio di STF a finestra multipla per il terremoto di Denali (2002): 6 finestre triangolari.

Nel caso di processo a finestra multipla, è già introdotta una discretizzazione temporale, e lo slip nonché l'andamento della velocità di slip, sui nuovi punti del grigliato può ottenersi da una convoluzione della distribuzione di slip con la STF. Nel caso di metodo a finestra singola, non è introdotta una discretizzazione temporale e la distribuzione dei tempi di rottura sulla faglia viene interpolata, per ricostruire l'andamento temporale sui nuovi punti.

Cohee & Beroza (1994) confrontano i due metodi nell'inversione delle forme d'onda, e stabiliscono che la tecnica della finestra singola è più adeguata alla conservazione del momento sismico e della velocità di rottura media.

Una funzione triangolare, così come una funzione troncata, introducono delle singolarità che disturbano il calcolo, e che si manifestano come picchi indesiderati nella velocità di slip. Per risolvere il problema si è deciso di effettuare un'operazione di 'smooth' della funzione di slip velocity attraverso la convoluzione con una funzione "box" che agisce come filtro e taglia le frequenze scomode (tale operazione viene chiamata 'running mean')

La box ha una durata che, nel dominio delle frequenze, determina il taglio poiché agisce come un filtro passabasso. La durata della finestra deve essere scelta opportunamente in modo da preservare il picco della velocità di slip, e tenere quelle frequenze che sono necessarie alla descrizione del modello (al calcolo delle funzioni di Green). In figura riportiamo un esempio di come la scelta della running mean possa influenzare l'andamento della velocità di slip.



**Figura 2.4:** Effetto della running mean sulla velocità di slip, a sinistra si assegna una running mean pari a 0.4s; a destra si assegna una running mean pari a 0.8s.

## 2.4 Interpretazione dell'andamento della trazione

La procedura descritta per la determinazione del modello dinamico non assume nessuna legge costitutiva, pertanto i parametri dinamici non sono assegnati a priori e possono essere stimati quando si sia calcolato l'andamento della trazione

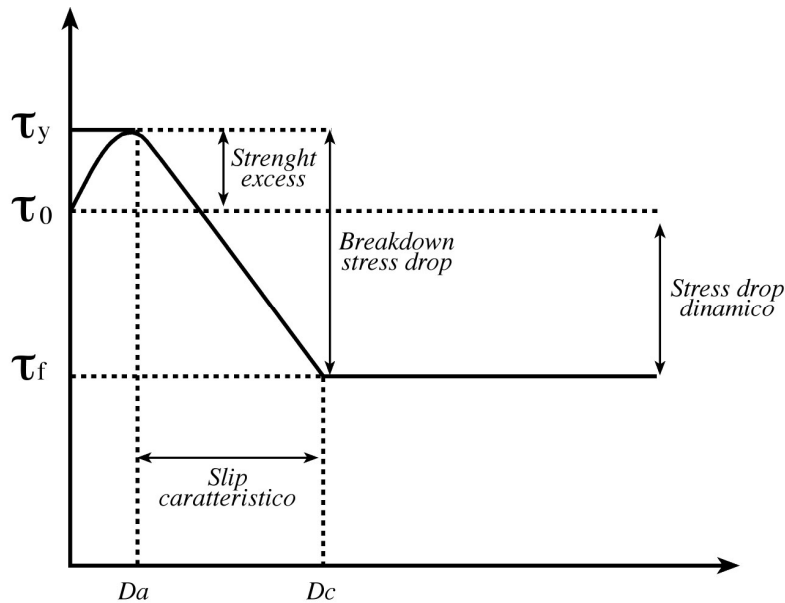


in relazione allo slip. Per interpretare l'evoluzione della trazione dinamica sul piano di faglia è necessario introdurre quelli che sono i parametri fondamentali.

In Figura 2.5 è riportato uno sketch dell'andamento della trazione in funzione dello slip come ottenuto solitamente dai modelli dinamici. La trazione si trova inizialmente ad un valore  $\tau_0$ . Il primo tratto rappresenta la fase di carico, *hardening*, della trazione. In questa fase la trazione cresce, senza produrre dislocazione oppure cresce producendo una dislocazione iniziale  $D_a$  (Ohnaka,1989). Una volta raggiunto un valore massimo di sforzo  $\tau_u$  la trazione inizia a decrescere durante una dislocazione caratteristica  $D_c$ , e raggiunge un valore costante  $\tau_f$ , di attrito dinamico.

La differenza tra il valore massimo di sforzo (valore di soglia) ed il valore iniziale della trazione è detta '*strength excess*' ovvero eccesso di sforzo ed ha la seguente espressione:

$$\Delta S = \tau_u - \tau_0 \quad (2.9)$$



**Figura 2.5:** Andamento della trazione in rapporto allo slip

Una volta raggiunto il valore di soglia si passa alla fase successiva, quella del *breakdown*; la dislocazione aumenta e parallelamente la tensione decresce ad un valore costante, in un tempo  $T_b$ , che è quello necessario alla trazione per portarsi al valore  $\tau_f$  (*frictional stress*) entro lo slip caratteristico  $D_c$ .

$\tau_f$  rappresenta il valore della trazione associato allo slip caratteristico  $D_c$ ; successivamente la trazione può oscillare intorno a questo valore mentre la dislocazione si arresta, oppure mantenersi costante mentre la dislocazione continua ad aumentare. Questa fase è detta di *healing*, o cicatrizzazione.

La caduta di tensione può essere valutata attraverso due parametri:

lo '*stress drop dinamico*' definito come la differenza tra la trazione iniziale  $\tau_0$  e la trazione  $\tau_f$ :

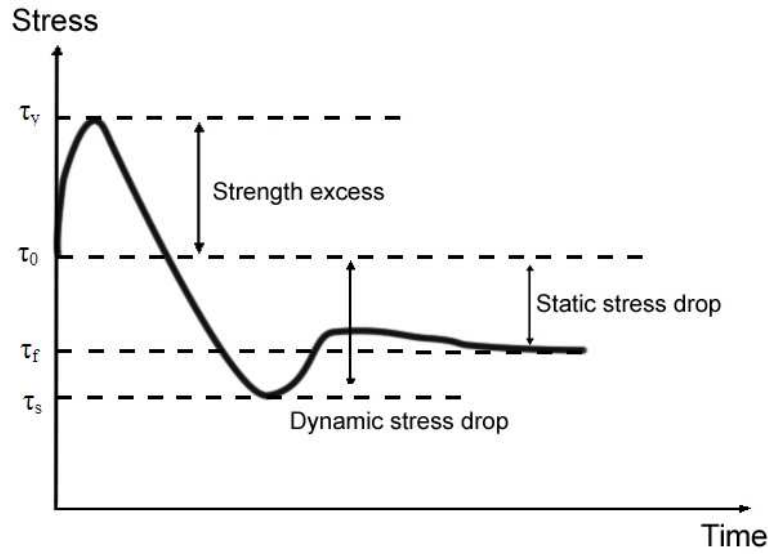
$$\Delta \tau_{dyn} = \tau_0 - \tau_f \quad (2.10)$$

e il '*breakdown stress drop*':

$$\Delta \tau_b = \tau_y - \tau_f \quad (2.11)$$

definito come la differenza tra la tensione di soglia e il frictional strength.

Una volta raggiunto il valore  $\tau_f$ , la trazione passa al valore  $\tau_s$  quando la sottofaglia smette di dislocare e la differenza  $\Delta \tau_s = \tau_0 - \tau_s$  misura la variazione finale dello stato di stress prodotto dal terremoto. Tale parametro è detto '*stress drop statico*'. Questa fase è descritta in figura 2.6, in cui è riportato l'andamento della trazione nel tempo.



**Figura 2.6:** Andamento della trazione nel tempo

Se si richiama l'attenzione sulla relazione che intercorre tra componente tangenziale e componente normale dello sforzo:

$$\tau_t = \mu(t)\sigma_n \quad (2.12)$$

la caduta di tensione è associata ad una variazione dell'attrito e la dislocazione è spiegata attraverso l'abrasione delle asperità che caratterizzano la superficie della faglia. Pertanto lo stress drop dinamico può essere riletto in questa chiave come la differenza tra il valore di trazione iniziale e l'attrito dinamico che controlla la dislocazione, mentre il breakdown stress drop come la differenza tra l'attrito statico ( $\tau_0 = \mu_s \sigma_n$ ) che la faglia è in grado di sostenere e l'attrito dinamico ( $\tau_f = \mu_d \sigma_n$ ).

La dipendenza di tale andamento dall'attrito introduce una dipendenza tra lo slip caratteristico  $D_c$  e il comportamento delle asperità; infatti, per alcuni autori, esso

scala con la rugosità delle superfici; per altri  $D_c$  scala con la magnitudo, ovvero con l'area della superficie di contatto effettiva.

La stima dei parametri dinamici e le leggi di scala che li relazionano ad altre variabili indipendenti, sono oggetto di questo studio e saranno analizzati nel capitolo successivo in relazione al comportamento dinamico che caratterizza il terremoto reale.

## **2.5 La scelta dello stress iniziale**

Il valore dello stress iniziale è legato alla storia della faglia, ad esempio un terremoto in generale libera solo parte dell'energia accumulata e la restante si colloca nelle zone di accumulo dello sforzo dove è probabile il verificarsi di una nuova rottura.

Lo stato di sforzo sulla faglia è determinato dalla direzione dell'asse principale di massimo sforzo tettonico rispetto alla direzione dello sforzo di taglio; la dislocazione diventa possibile nel momento in cui questa componente supera il valore di attrito statico. Il processo di fagliazione ha luogo in una situazione di pre-stress causata dal continuo accumulo dello sforzo tettonico ed è determinato da una variazione improvvisa dello stato di sforzo. In un mezzo omogeneo e isotropo, la direzione in cui lo stress varia per produrre l'instabilità genera una dislocazione nella stessa direzione. Lo stato di stress iniziale può però introdurre una componente della trazione in una direzione differente da quella determinata dalla caduta di sforzo, e generare così uno slip con direzione variabile. L'angolo di rake, che descrive la direzione della dislocazione sul piano di faglia, in questo caso è pertanto variabile.

Lo stato di stress iniziale non è noto, e non è pertanto possibile effettuare una stima 'assoluta' dei parametri dinamici ma solo relativa. Il caso più semplice è, di conseguenza, quello in cui il rake è costante e la trazione è collineare con la dislocazione; in questo caso il lavoro risulta indipendente dalla scelta della trazione iniziale ed è possibile determinare i parametri dinamici a prescindere da

questa informazione. Quando invece la direzione in cui si propaga la rottura presenti due componenti, o quando il rake sia variabile nel tempo, la determinazione di tali parametri non può prescindere dalle condizioni iniziali.

In questo caso si sceglie un valore iniziale tale da minimizzare l'angolo formato dallo slip e dalla trazione. Questa scelta trova giustificazione nei seguenti motivi: il primo è che quando il rake è costante lo slip e la trazione sono collineari; il secondo è che assegnando la stessa direzione allo slip e alla trazione, se lo slip mostra eterogeneità può assegnarsi la stessa eterogeneità alla trazione sul piano di faglia. Inoltre questa scelta permette di prevenire rotazioni eccessive del vettore di trazione attraverso l'assegnazione di un valore iniziale che tenga la trazione più o meno collineare con lo slip.

## Capitolo 3

### **L'evoluzione della trazione dinamica per forti terremoti recenti.**

Nel precedente capitolo abbiamo descritto il metodo utilizzato in questa tesi per risolvere l'evoluzione della trazione sul piano di faglia e quindi per ricavare i parametri dinamici di un evento sismico dato il suo modello cinematico. In questo capitolo vengono mostrati i risultati di tale metodo applicato ad un set di forti terremoti recenti.

Nei paragrafi seguenti sono descritti in forma schematica gli aspetti principali dei modelli cinematici degli eventi sismici utilizzati in questo studio. In particolare viene descritta la parametrizzazione necessaria per ricavare l'evoluzione della trazione dinamica sul piano di faglia con il metodo alle differenze finite. Un passo fondamentale infatti per ricavare la soluzione numerica dell'equazione dell'elastodinamica attraverso la procedura delle differenze finite, è quello di avere una buona discretizzazione spazio-temporale del piano di faglia in modo da risolvere la zona coesiva.

Primo obiettivo di questo lavoro è quindi quello di calcolare e interpretare l'andamento della trazione dinamica per un set di terremoti recenti. Viene ampliato il set di dati studiato da Tinti et al. (2005) aggiungendo i seguenti eventi sismici: Parkfield (2004), Denali (2000), San Simeon (2003), Superstition Hills (1987), Fukuoka (2004) ed Hector Mine (1999).

Un secondo obiettivo è quello di verificare gli effetti sull'evoluzione della trazione della stratificazione 1D rispetto ad un modello omogeneo delle velocità della struttura; questo confronto è stato effettuato per il terremoto di Morgan Hill (1984).

Un terzo obiettivo è quello di valutare l'energia spesa durante il processo di caduta della trazione sul piano di faglia, la distribuzione dei principali parametri dinamici, e la loro relazione con la distribuzione di slip ricavata dal modello cinematico.

Un passo successivo verrà affrontato nel prossimo capitolo, dove valuteremo le relazioni che intercorrono tra i parametri dinamici qui presentati.

### 3.1 Modelli cinematici di alcuni terremoti recenti

Qui di seguito riportiamo la tabella in cui vengono riassunte le caratteristiche essenziali di ogni terremoto. La descrizione dei modelli, presentata nei paragrafi successivi, è tratta dai relativi articoli presi in letteratura; le referenze sono riportate in testa allo schema. Nella tabella 1 vengono schematizzate le caratteristiche principali dei terremoti presentati in questo studio. La STF e la running mean sono rispettivamente, con riferimento a quanto discusso nel precedente capitolo, la funzione sorgente usata dal modellatore nel modello cinematico e la larghezza della funzione rettangolare con cui viene convoluta la STF.

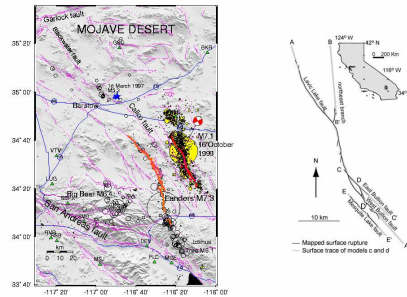
Terremoto	$M_0$ (Nm)	Dimensioni faglia (km <sup>2</sup> ) LxW	Slip medio (m)per km <sup>2</sup>	Slip max (m)	$V_r$ (km/s)	STF	RM(s)
<b>Imperial Valley</b> Hartzell e Heaton, 1983	8.64e+18	42x10.5	0.6	2.194	2.6	1 triangolo tr=0.7s, tsalita=0.2s	0.3
<b>Landers</b> Wald e Heaton, 1994	9.26e+19	78x15	2.46	10.658	2.7	6 triangoli tr1=1s , td=1s	1
<b>Landers</b> Hernandez et al., 1999	1.02e+20	80x15	1.88	7.0202	2.6	Tanh tr=variabile	
<b>Northridge</b> Wald et al. 1996	1.22e+19	18x24	0.985	3.297	≈ 3	3 triangoli tr1=0.6s, td=0.4s	0.6
<b>Morgan Hill</b> Beroza and Spudich 1988	2.62e+18	30x10	0.2462	2.732	≈ 2	Kostrov troncata tr=0.2s	0..07
<b>Kobe</b> Wald, 1996	2.44e+19	60x20	0.6196	3.831	2.8	6 triangoli tr1=0.7s , td=0.4s	0.5
<b>San Simeon</b> Dreger, 2005	8.00241e+18	44x22	0.4014	2.9011	2.6	1 Triangolo tr=3s	0.6
<b>Hector Mine</b> Ji et al.,2000	6.70e+019	54x16.2			2.0 variabile	Cos tr=var	

Terremoto	M <sub>0</sub> (Nm)	Dimensioni faglia (km^2) LxW	Slip medio (m)per km^2	Slip max (m)	V <sub>r</sub> (km/s)	STF	RM(s)
<b>Tottori</b> Yagi	11e+18	24x14	0.992	2.1842	≈ 2	39 triangoli tr1=0.5s , td=0.25s	0.5
Sekiguci	19e+18	28x17	1.1324	5.4278	≈ 1.9	6 triangoli tr1=1s , td=0.2	
Piatanesi	1.158e19	32x20	0.537	2.0862	≈ 2.4	Tanh tr=variabile	
00 01	1.1952e19		0.5543	2.6889	≈ 2.7		
<b>Colfiorito</b> <b>0.33</b> <b>9.40</b> <b>Ottobre</b>  Hernandez et al., 2004	4.381e+17 1.039e+18 6.478e+17	7.5x7.5 12.5x7.5 9x6	0.29 0.415 0.4467	0.861 1.777 0.939	≈ 2.2 ≈ 2.3 ≈ 1.8	Tanh tr=1s	
<b>Denali</b> Asano Iwata, Irikura, 2005	variabile tot =7.57e+20	292.5x18	4.2944	17.7643	2.8 seg1,2 3.6 seg3,4	6 Gaussiane tr=2 , td=1	0.8
<b>Parckfield</b> Liu,Custodio,Archuleta, 2005	1.08e+18	40x15	0.0716	0.5840	variabile	Sen,Cos tr var	--
<b>Superstition Hill</b>  Wald et al. 1990	6.57e+18	20x11.5	0.7779	4.61333	2.4	9 triangoli a gruppi di tre tr=0.5; td=0.5 trig2=2.1 trig3=8.6	0.6
<b>Fukuoka</b> Asano, Iwata, 2006	1.15e+19	26x18	0.8101	3.4222	2.1	6 Gaussiane tr=2s td=1s	0.8

Tabella 1:  $M_0$  è il momento sismico,  $V_r$  la velocità di rottura (nei casi in cui la velocità di rottura sia variabile viene riportata la media, simbolo ≈),  $t_r$  è il rise time,  $t_d$  è la distanza tra due finestre temporali, nel caso in cui si tratti di un modello multiwindow.



### 3.1.1 Hector Mine



L'evento sismico, di magnitudo  $M_w 7.1$ , è localizzato in una parte remota e scarsamente popolata del deserto di Mojave, a 32 miglia nord di Joshua Tree, California. Ha luogo il 16 Ottobre del 1999 alle ore 09:46:44 (UTC).

La rottura ha inizio nel segmento centrale della Lavic Lake fault e si

propaga per circa 20s generando una superficie di rottura complessivamente pari a  $874 \text{ km}^2$ . La faglia è composta da tre segmenti sovrapposti, il primo (Lavic Lake West Branch) si sovrappone a quello centrale (Lavic Lake Middle Branch) per 21km, il terzo (la Bullion Fault) si sovrappone al segmento centrale per 9 km. (Figure tratte da: *USGS web page*).

#### Modello cinematico di Ji et al., (2000)

Il modello cinematico è quello formulato da Ji et al. (2000).

L'ipocentro è collocato a  $34.590^\circ$  di latitudine N e a  $116.270^\circ$  latitudine W, ad una profondità di circa 15km.

Data	Luogo			Lat(°)	Lon (°)	Depth(Km)
16/10/1999	Mojave Desert, California SE			34.590	-116.270	15
<b>Mw=7.18</b>	<b>Mo=6.70e+019</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Lavic Lake (middle branch)	-116.239	34.466	0.275	33x16.2	346	85
Lavic Lake (west branch)	-116.108	34.571	0.261	21x15.4	322	75
Bullion fault	-116.108	34.311	0.269	30x16.2	325	85

Abbiamo semplificato il modello cinematico proposto dagli autori sovrapponendo i segmenti in modo da ottenere un' unica faglia lunga 54km.

Ji et al. (2000) propongono due modelli per Hector mine: il primo a velocità costante pari a 2.0 km/s il secondo con velocità variabile. In entrambi i modelli il rise time, e il rake sono variabili.

In tale modello la rottura è descritta da una funzione cosinusoidale (modello a finestra singola) di rise time variabile. Lo slip massimo per entrambi i modelli è pari a 9.1m e si concentra in una zona ad una decina di km dall'ipocentro. La durata del terremoto è di circa 20s.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 2.7 x 3.0 (km)
Numero di sottofaglie: 6x18
Dimensioni: 54 km x 16 km
Ipocentro: xhyp=17.50 km, yhyp=14.80 km
STF: $S = \left( 1 - \cos \frac{(2 * \pi * \frac{t}{trise})}{trise} \right)$
Numero di finestre temporali: 1
Risetime: variabile
Intervallo tra finestre successive:--
Velocità di rottura: 1° modello 2.0 km/s
2° modello variabile
Segmenti sovrapposti: vedi testo
rake: variabile (right lateral strike slip)

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 x 0.25 (km)
Numero di sottofaglie (ny,nx,nt): (81x270x1100)
Intervallo temporale dta (s): 0.02

In questo caso non abbiamo fatto uso della convoluzione con una box-car poiché la STF risulta non singolare..

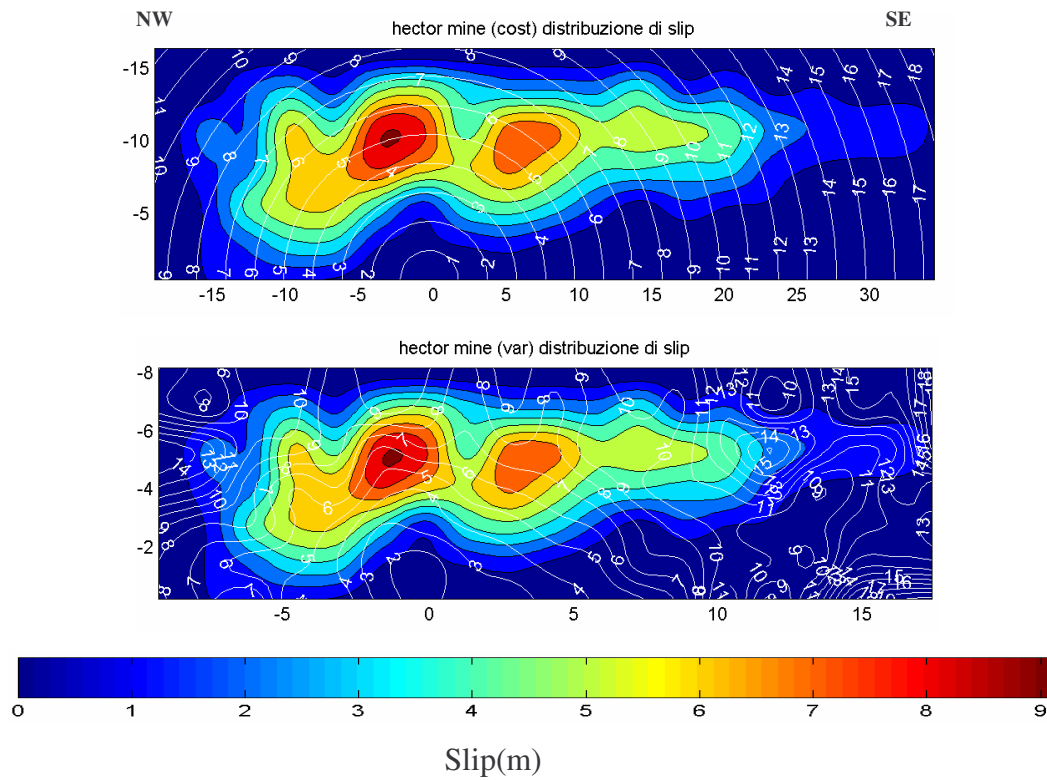
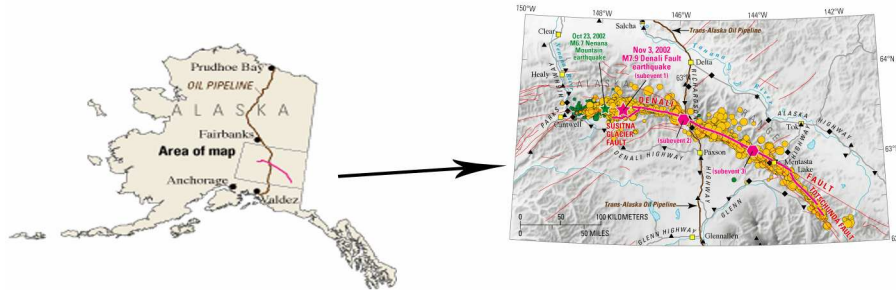


Figura 3.1: La distribuzione dello slip per il terremoto di Hector Mine: in alto modello a velocità costante pari a 2.0 km/s; in basso modello a velocità di rottura variabile.

### 3.1.2 Denali



L'evento sismico (7.9Mw) ha inizio il 3 Novembre 2002 alle 22:12 (UTC), nel sistema di faglie di Denali, un sistema che si estende per più di 2000 Km attraverso la Alaska. La rottura ha inizio nella Sustina Glacier fault e si propaga attraverso il segmento McKinley con velocità di rottura pari a 2.6 km/s. Nel segmento Shakwak e nella faglia Totshunda, dove si arresta la rottura, la velocità di propagazione è pari a 3.4 km/s.

Questa velocità è superiore alla velocità delle onde S (supershear rupture) e si ritiene che possa essere raggiunta in rotture di tipo in-plane. Un simile andamento della velocità è stato individuato in sistemi simili a quello di Denali dal punto di vista dell'estensione nella direzione strike e del contesto geotettonico, come nel caso di Imperial Valley e di Landers.

La durata complessiva dell'evento è stimata intorno ai 90s e la superficie di rottura è approssimativamente di 300Km. Principalmente la rottura si muove in direzione strike slip e nella zona ipocentrale la direzione dello slip è prevalentemente di tipo dip-slip puro. (Figure tratte da: *USGS web page*)

Modello cinematico di Asano K., Iwata T., Irikura K.(2005)

L'ipocentro è collocato da K. Asano et al. a 61.5141° di latitudine N e 147.4529° di longitudine W, ad una profondità di circa 5.6 km.

Data	Luogo			Lat(°)	Lon (°)	Depth(Km)
03/11/2002	Alaska			61.5141	-147.4529	5.6
<b>Mw=7.9</b>	<b>Mo=7.57e+20</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Sustina Glacier Fault	-147.9410	63.4698	0.578	31.5 x 18	262	48
McKinley	-147.3191	63.5211	0.005	72 x 18	279	86
Shakwak	-145.8915	63.4202	0.005	126 x 18	298	86
Totshunda Fault	-143.6574	62.8898	0.005	63 x 18	315	86

Denali si sviluppa su 4 segmenti non sovrapposti, che presentano caratteristiche fisiche diverse a causa della struttura di cui sono costituite. In particolare Asano et al. (2005) definiscono due velocità di rottura differenti per le coppie di segmenti adiacenti. Abbiamo semplificato il modello proposto dagli autori in modo da ottenere un'unica faglia di lunghezza complessiva pari a 292.5km. La funzione sorgente è una Gaussiana, di rise time pari a 2.0s, per la quale non è stato necessario operare una convoluzione. La rottura è descritta da un modello a finestre multiple, nel caso specifico 6 finestre temporali non sovrapposte.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 4.5 x 4.5 (km)
Numero di sottofaglie: 4x65
Dimensioni: 18 km x 292.5 km
Ipocentro: xhyp=268 km, yhyp=5.6 km
STF:Gaussiana $S = \frac{M_0}{\mu A} \left( 1 - \frac{\tanh(4 * \frac{(t - t_0)}{2})}{t_0} \right) * \frac{2}{t_0}$
( $M_0$ momento sismico, $\mu$ rigidità, $A$ area sottofaglia, $t_0$ tempo di rottura)
Numero di finestre temporali: 6
Risetime: 1 finestra, 2.0s
Intervallo tra finestre successive:1s
Velocità di rottura: 2.8 Km/s per i segmenti 1 e 2
3.4 km/s per i segmenti 3 e 4
Nessuna sovrapposizione tra i segmenti
rake: componente strike: 135°, componente dip: 45° segmento 1
componente strike: 180°, componente dip: 90° segmenti 2-4

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.4 km x 0.4 km
Numero di sottofaglie: 45x732x1875
Intervallo temporale dta (s): 0.05

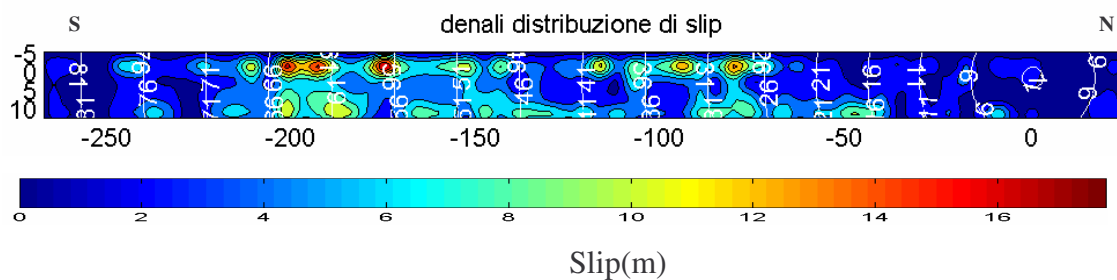
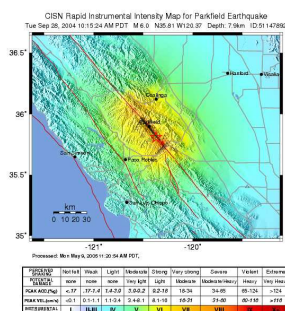


Figura 3.2: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Denali (2002).

### 3.1.3 Parkfield



L'evento sismico è collocato a 11km SW dalla città di Parkfield, la rottura si muove lungo un tratto della faglia di San Andreas, verso NW, per un tempo complessivo di approssimativamente 10s generando una superficie di rottura pari a 600km. L'evento è di magnitudo 6.0Mw e ha inizio il 28/09/ 2004 alle ore 17:15 (UTC). Questo

episodio è il più recente di una serie di terremoti avvenuti a cadenze insolitamente regolari tra il 1857 e il 1966, in particolare si svolge sullo stesso segmento di faglia del terremoto del 1966, i primi 2 eventi svolgendosi nella direzione opposta. L'ipocentro è collocato, nel modello di Liu et al. , (2006) a 35.8185° di latitudine N, e 120.3706 di longitudine W, ad una profondità di 8.26 km. (In figura: la mappa di intensità del terremoto, tratta da: *USGS web page*).

Modello cinematico di Liu P., Custodio S., Archuleta R.J (2006)

Data	Luogo			Lat(°)	Lon (°)	Depth(Km)
28/09/2004	San Andreas Fault, California			35.8185	-120.3706	8.26
<b>Mw=6.0</b>	<b>Mo=1.08e+18</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Parkfield	-120.3706	35.8185	8.26	40x15	140SE	87SW

Gli autori propongono 10 modelli migliori, che tengano anche conto degli effetti di amplificazione del sito. In questo studio prendiamo in esame il modello con il misfit migliore tra sismogramma sintetico e registrazione reale ( $E(M)=0.456$ ).

Il rake e la velocità di rottura variano sulla faglia, la STF è una funzione sinusoidale di rise time variabile (modello a finestra singola). Dallo studio di Liu et al. (2006) emerge che la velocità di rottura è mediamente superiore alla velocità delle onde S nella zona a NW dell'ipocentro, anche se gli autori escludono un modello super-shear per la descrizione del modello. Sebbene il rake sia variabile in ogni sottofaglia la zona vicina all'ipocentro risulta comportarsi come trascorrente destro, mentre nel resto della faglia il comportamento predominante è di tipo inverso

La velocità di rottura è variabile sulla faglia, la durata dell'evento è di circa 10s; la dislocazione massima si concentra in una zona vicina all'ipocentro, ed è pari a 0.6m. La funzione sorgente è una funzione sinusoidale asimmetrica di rise time variabile, ovvero con tempo di salita e discesa differenti.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 2x2 (km)	
Numero di sottofaglie: 9x21	
Dimensioni: 15 km x 40 km	
Ipocentro: $x_{hyp}=30$ km, $y_{hyp}=8.26$ km	
$STF: S(t) = \begin{cases} A \sin\left(\frac{t}{T_1} \frac{\pi}{2}\right) & per \quad 0 < t < T_1 \\ A \left[ 1 + \cos\left(\frac{t-T_1}{T_2} \pi\right) \right] & per \quad T_1 < t < T_1 + T_2 \end{cases}$	

$T_1$ tempo di salita: variabile
$T_2$ tempo di discesa: variabile
A: $\frac{1}{A} = \frac{2T_1}{\pi} + \frac{T_2}{2}$
Velocità di rottura: variabile
Velocità media: 2.7 Km/s vicino all'ipocentro
3.6 km/s NW dell'ipocentro
Rake: variabile

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.15 km x 0.15 km
Numero di sottofaglie: 100 x 267x1093
Intervallo temporale dta (s): 0.01s
Ipocentro: xhyp=10, yhyp=8.26

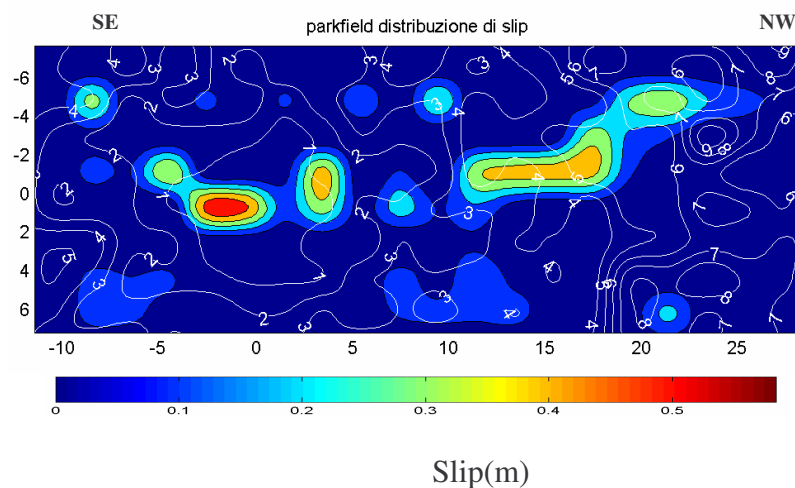
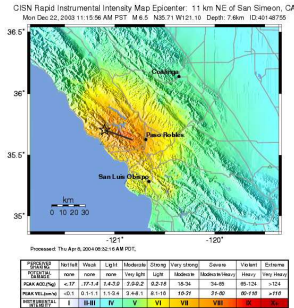


Figura 3.3: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Parkfield (2004).

In questo caso non abbiamo fatto uso della convoluzione con una box-car poiché la STF risulta già sufficientemente ben definita.



### 3.1.4 San Simeon



Il terremoto di San Simeon avviene a 35km NW della città di Pablo Robles, 11km NE da San Simeon, 17 km N da Cambria, il 22/12/2003 alle ore 19:15:56 (UTC), di magnitudo Mw 6.5. Si tratta di una faglia inversa, e tale comportamento non è insolito nel contesto della California centrale (McLaren, Savane, 2001) ed è causato dalle componenti compressive del moto della placca Nordamericana e quella pacifica. La rottura si propaga verso SE per un tempo di circa 15s. L'ipocentro è posto a 35.706° latitudine N e 121.102° longitudine W, ad una profondità di 8.0 km (modello D. S. Dreger, 2005). (In figura: la mappa di intensità del terremoto, tratta da: *USGS web page*)

Modello Dreger D. S. et al. (2005)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
22/12/2003	San Andreas Fault, California			35.706000	-121.102	8.0
<b>Mw=6.5</b>	<b>Mo=8.00241e+18</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
San Simeon	-121.1020	35.706000	8.0	44x22	300	51

La dislocazione è insolita sotto tre aspetti: la direzione della rottura è molto differente rispetto a quella degli eventi sismici precedenti; il valore dello slip medio strumentale non è in accordo con il valore del momento sismico descritto da relazioni empiriche; il rise time è mediamente più lungo di quello atteso in base al valore del momento. La velocità di rottura che produce il fit migliore con i dati è 2.6 km/s, la durata del terremoto è di circa 13s, la dislocazione sulla faglia, determinata dal modello interpolato, raggiunge il massimo valore di 2.9m. Purtroppo, per questo evento, non si è ancora elaborato un modello cinematico attendibile.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 2.0 x 2.0 (km)
Numero di sottofaglie: 11x22
Dimensioni: 22km x 44 km
Ipocentro: xhyp=32 km, yhyp=8 km
STF: 1 triangolo
Trise=3.0 s
Velocità di rottura: 2.6 km/s
Rake: 76°, thrust faulting

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.2 km x 0.2 km
Numero di sottofaglie: 220x110x882
Intervallo temporale dta (s): 0.02s
Running mean: 0.6 s

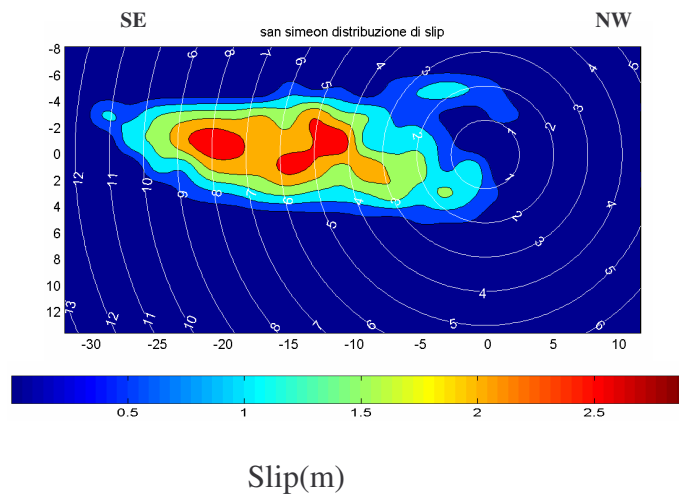
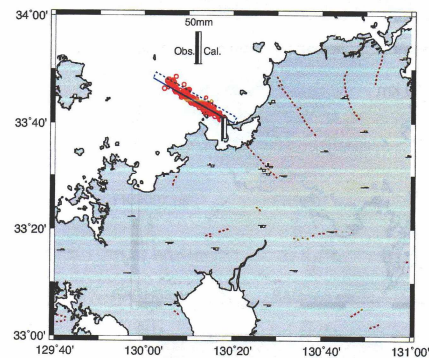


Figura 3.4: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto San Simeon (2003).

### 3.1.5 Fukuoka



L'evento sismico, della durata di circa 50s, si verifica a Kyushu, Giappone, alle ore 01:53:41(UTC) del 23/03/2005, su una faglia sconosciuta, nel mare Genkai a 30 km NW da Fukuoka, a 110 km N da Nagasaki, e a 900 km W da Tokyo. La magnitudo stimata, nel modello di K. Asano, T. Iwata (2006), è pari a 6.5Mw; l'ipocentro è collocato a 33.75° di latitudine nord, e 130.16° di longitudine est, e ad una profondità di circa 14km. La nuova faglia è piuttosto l'estensione della faglia di Kego, passante da NW a SE proprio sotto la città. (Figure in alto tratte da: a dx: *USGS web page*, a sx: *Asano et al, 2006*).

#### Modello cinematico di Asano K., Iwata (2006)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
20/03/2005	Kyushu, Japan			33.75°N	130.16°E	14
<b>Mw=6.5</b>	<b>Mo=1.15e+19</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Fukuoka	130.078°E	33.805°N	10	26x18	122	87

Gli autori invertono il modello cinematico determinando un momento sismico variabile sul piano di faglia attraverso il quale è possibile ricostruire la dislocazione a partire dalla conoscenza dei parametri elastici e della dimensione della superficie della sottofaglia.

Utilizzano un metodo multi-windows con 6 finestre e una funzione di velocità di slip Gaussiana (6 rampe in termini di slip).

Il momento sismico totale risultante è pari a  $1.15 \times 10^{19} \text{ Nm}$  (6.6Mw), lo slip massimo è pari a 3.2 m e si concentra in una zona a circa 10km dall'ipocentro. La durata dell'evento è di circa 10s.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante:

Dimensione della sottofaglia: 2.0 x 2.0 (Km)
Numero di sottofaglie: 9x13
Dimensioni: 18km x 26km
Ipocentro: $x_{hyp}=12 \text{ km}$ , $y_{hyp}=14 \text{ km}$
STF:Gaussiana $S = \frac{M_0}{\mu A} \left( 1 - \frac{\tanh(4 * \frac{(t - t_0)}{2})}{t_0} \right) * \frac{2}{t_0}$
( $M_0$ momento sismico, $\mu$ rigidità, $A$ area sottofaglia, $t_0$ tempo di rottura)
Numero di finestre temporali: 6
Risetime: 1 finestra, 1.0s
Intervallo tra finestre successive: 0.5s
Velocità di rottura: 2.1 km/s
Rake: componente strike: $0^\circ$ componente dip: $90^\circ$

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.2 km x 0.2 km
Numero di sottofaglie: 45x65x604
Intervallo temporale dta (s): 0.02s

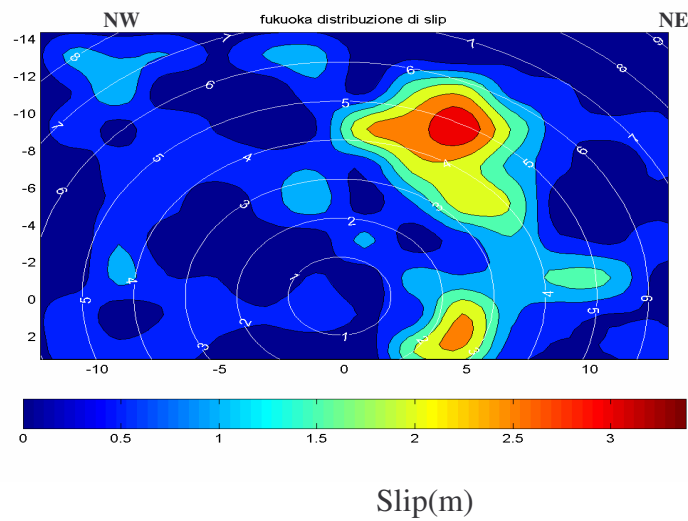
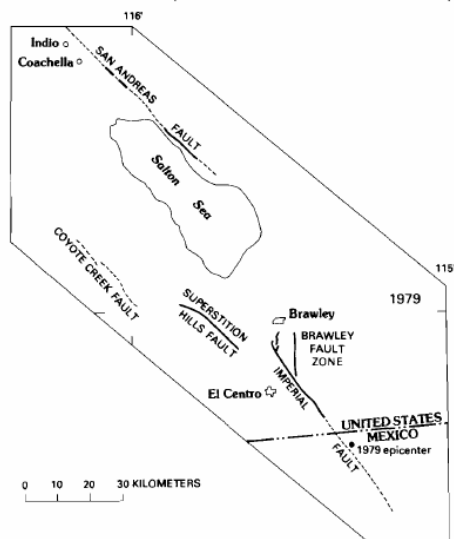


Figura 3.5: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Fukuoka (2005)

In questo caso non abbiamo fatto uso della convoluzione con una box-car poiché la STF risulta già sufficientemente ben definita.

### 3.1.6 Imperial valley



L'evento sismico ha luogo il 15 Ottobre del 1979 in una zona situata a 8 km N di Calexico, a 29 km SE da El Centro e a 145km E di San Diego, alle ore 23:16:54 (UTC). L'evento principale, 6.6Mw, è stato collocato ad  $32.64^\circ$  di latitudine N e  $115.31^\circ$  di longitudine W e ad una profondità di 8 km (modello Hartzell and Heaton, 1983). L'evento è della durata complessiva di circa 17s.

Modello cinematico di Hartzell and Heaton (1983)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
15/10/1979	California, confine con il Messico			32.64N	-115.31(W)	8
<b>Mw=6.6</b>	<b>Mo=8.64e+18</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Imperial Valley	-115.31(W)	32.64N	8	42x10.5	323	90

Gli autori sviluppano 30 inversioni separate, variando il tipo di dato sismico utilizzato (dato telesismico, strong motion, uso combinato delle due), la velocità di rottura, la profondità dell'ipocentro, in modo da determinare i sismogrammi sintetici in miglior accordo con i sismogrammi registrati alle stazioni. Il fit migliore è ottenuto dall'uso combinato dei dati telesismici e i dati strong motion, e dall'assegnazione di una velocità di rottura costante pari a 2.5km/s. La rottura è rappresentata da un modello multi-windows, descritto da tre funzioni triangolari separate da un intervallo di 0.5s. Tale separazione temporale è dovuta, da un lato, all'esigenza di permettere al fronte di rottura di propagarsi per tutta l'estensione stimata della faglia, dall'altro, alla necessità di eludere eventuali interferenze distruttive tra le forme d'onda generate dalle finestre temporali.

La dislocazione è pari a circa 20 cm nella zona epicentrale e cresce fino ad un massimo di 2 m sotto la Statale 8, presa dai modellatori come riferimento sulla superficie terrestre. La durata del terremoto è di circa 17s; la direzione principale di slip è lungo la componente di strike. Il modello è meglio rappresentato da una velocità di rottura che vari da un minimo di  $0.7\beta$  vicino all'ipocentro e  $0.9\beta$  sotto la Statale 8, pertanto si assume una velocità di rottura costante pari a 2.6km/s, in modo da rappresentare al meglio la rottura su tutta la faglia..

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 2.6 km x3.0 km
Numero di sottofaglie: 4x14
Ipocentro:xhyp=35.50 km, yhyp=10.50 km
STF: Triangolo
Numero di finestre temporali: 3
Risetime: .0.7s
Intervallo tra finestre successive: overlap di 0.2s
Velocità di rottura: 2.6 km/s
Rake: due componenti 180°,90°

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 km x 0.25 km
Numero di sottofaglie:42x168x1787
Intervallo temporale dta (s): 0.01s
Running mean: 0.3s

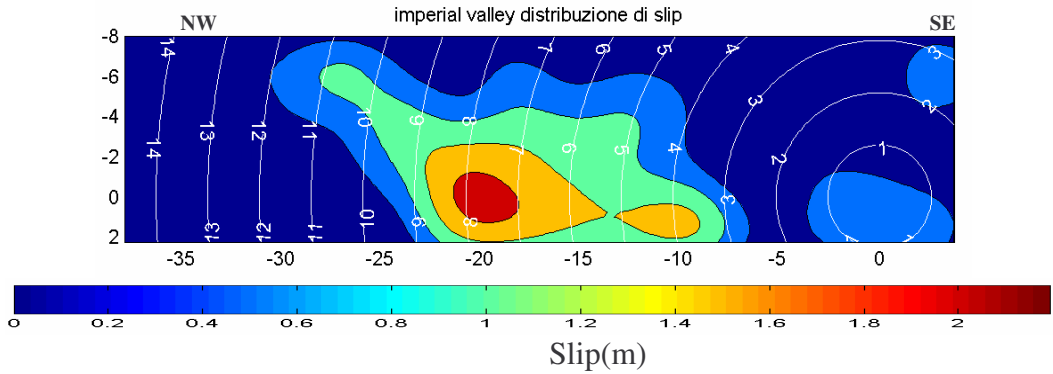
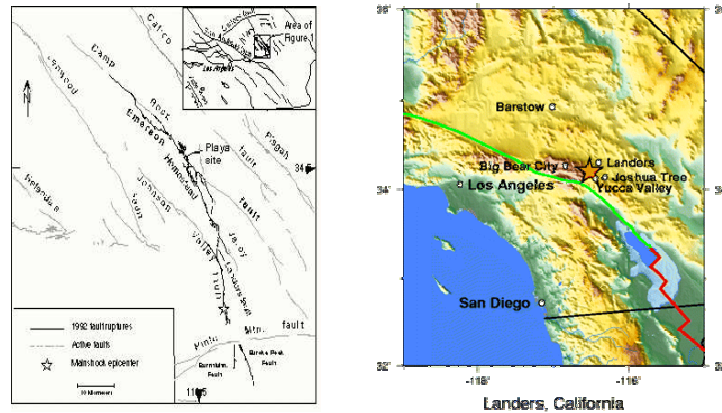


Figura 3.6: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Imperial Valley (1979)

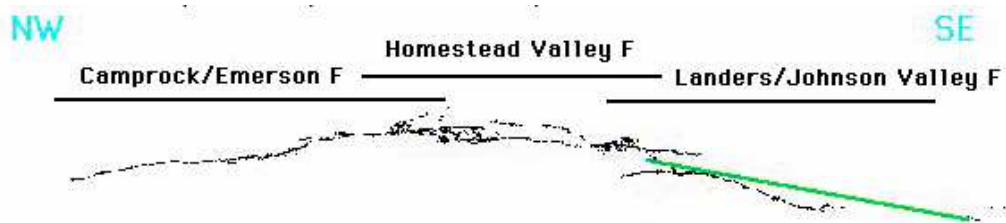
### 3.1.7 Landers



L'evento sismico del 28 Giugno 1992 (magnitudo 7.3Mw) ha inizio alle ore 11:57:34 UTC nel sud della California in una zona situata a 6 miglia dalla Yucca Valley, nel Mojave Desert. La rottura si propaga in direzione nord dalla faglia di Johnson Valley, percorrendo i successivi segmenti dell'Homestead Valley e Camprock/Emerson orientati verso NW. La durata complessiva del terremoto è di circa 24s, durante i quali la rottura si propaga su una lunghezza complessiva di circa 70 km.

Il fronte di rottura rallenta una volta raggiunto il limite nord della Johnson Valley dove lo slip viene trasferito al segmento successivo; lo stesso accade nel passaggio successivo.

L'evento principale è situato a  $34.200^{\circ}$  N e  $116.430^{\circ}$  W ad una profondità di 7.0 km (Hernandez et al., 1999). Per questo terremoto è stato pubblicato anche un secondo modello, Wald e Heaton, 1994, i quali pongono l'ipocentro in  $34.228^{\circ}$  N.  $116.440^{\circ}$  W e ad una profondità di 6.0 km. (Figure tratte da: *USGS web page*).





L'evento sismico si sviluppa su tre segmenti: La faglia di Camprock/Emerson, la faglia Homstead Valley, la faglia Jhonson Valley ( nelle tabelle sono riassunte le caratteristiche principali relative ai due modelli, quello di Wald et al. (1994) e quello di Hernandez et al. (1999). Qui di seguito descriviamo i due modelli in dettaglio. Nella procedura di interpolazione si semplifica il modello proiettando la distribuzione di slip su un'unica faglia, ottenuta sovrapponendo i tre segmenti.

#### Modello cinematico di Wald, Heaton (1994)

Il modello di rottura è di tipo multiwindows, ed è descritto da 6 funzioni triangolari. Le sei funzioni triangolari descrivono in modo esauriente la faglia in modo da tenere conto della complessità della storia di slip, delle perturbazioni alla velocità di rottura uniforme, la possibilità che ci sia un ritardo del fronte nel passaggio da un segmento al successivo. Si assume una velocità di rottura costante pari a 2.7 km/s.

Lo slip cresce verso nord, nella faglia Homstead Valley supera i 6m, valori simili sono raggiunti nella faglia Camp Rock/Emerson. (il valore massimo raggiunto nel modello interpolato è pari a 10.7m). La durata dell'evento è di circa 24s.

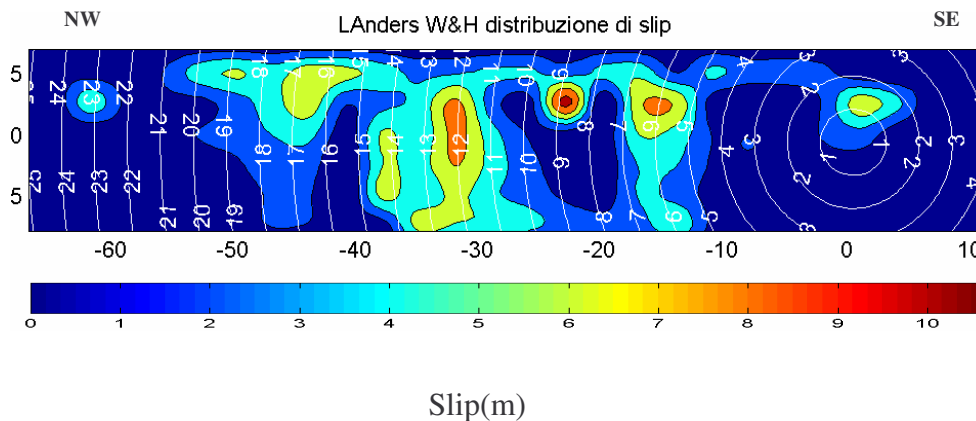
Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
28/06/1992	California, 6 miglia N Yucca valley			34.228	-116.440	6.0
Mw=7.3	Mo=9.26e+19					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Camprock/Emerson	-116.595	34.572	6.0	36.0x15.0	320	90
Homstead Valley	-116.482	34.415	6.0	27.0x15.0	334	90
Johonson Valley	-116.440	34.228	6.0	34.0x15.0	355	90

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 2.5 km x3.0 km
Numero di sottofaglie: 6x26
Dimensioni faglia: 15 km x78 km
Ipocentro: xhyp=19 km, yhyp=7.0 km
STF: triangolo
Numero di finestre temporali: 6
Risetime di una finestra: 1s
Velocità di rottura: 2.7
Rake: 180° strike slip

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.4 km x0.4 km
Numero di sottofaglie:38x196x842
Intervallo temporale dta (s): 0.04s
Running mean: 1s



**Figura 3.7: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Landers (1992)**

#### Modello cinematico di Hernandez et al. (1999)

Il valore massimo di slip è raggiunto a circa 40km dall'ipocentro ed è pari a circa 7m (il modello interpolato restituisce lo stesso valore). La distribuzione di slip è molto eterogenea, tale da variare di molti metri in pochi km; l'area di rottura cresce dove sono verificate condizioni più favorevoli e si ferma in prossimità delle zone di

resistenza. Alcune di queste resistenze viene aggirata o 'saltata' dal fronte in avanzamento.

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
28/06/1992	California, 6 miglia N Yucca valley			34.200	-116.430	7.0
<b>Mw=7.22</b>	<b>Mo=1.02e+20</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Camprock/Emerson	-116.595	34.572	7.0	30.0x15.0	317	90
Homstead Valley	-116.482	34.415	7.0	25.0x15.0	339	90
Johonson Valley	-116.440	34.228	7.0	25.0x15.0	355	90

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 5.0 km x5.0 km
Numero di sottofaglie: 3x16
Dimensioni: 15 km x80 km
Ipocentro: xhyp=70.0 km, yhyp=6.0 km
STF: tanh
Numero di finestre temporali: 1
Risetime: variabile
Velocità di rottura: variabile
Rake: 180° right lateral strike slip

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 x 0.25
Numero di sottofaglie: 61x321x1400
Intervallo temporale dta (s): 0.02s

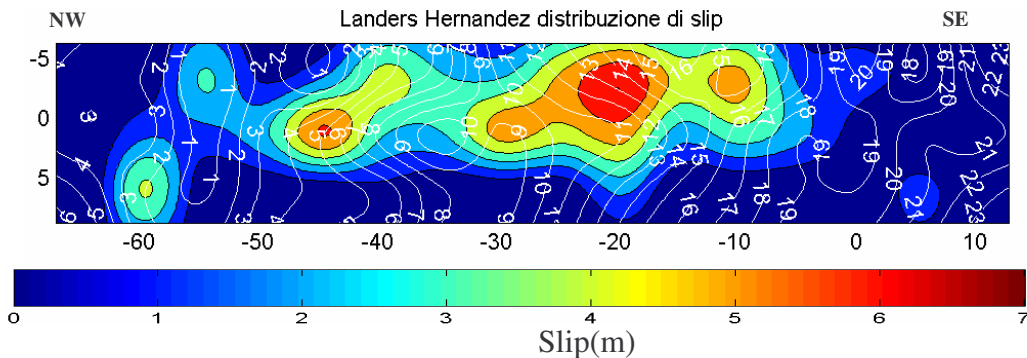
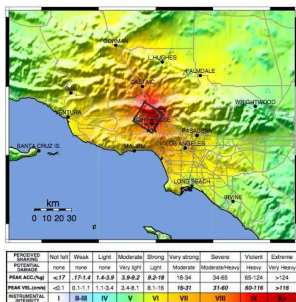


Figura 3.8: La distribuzione di slip e i tempi di rottura per il terremoto di Landers (1992).

### 3.1.8 Northridge



Il terremoto di Northridge avviene alle ore 12:30:55 (UTC) il 17 gennaio 1994, in una zona situata a circa 30 km NW da Los Angeles, su una faglia cieca, ovvero su una faglia che non raggiunge la superficie ma, nello specifico, resta a 5 km di profondità. L'evento è di magnitudo 6.9Mw, la durata complessiva di circa 20s. L'ipocentro è collocato a  $34.334^{\circ}$  N di latitudine e  $118.515^{\circ}$  W di longitudine, ad una profondità pari a 19.4 km nel modello di Wald e Heaton, 1994. (In figura: la mappa di intensità del terremoto, tratta da: *USGS web page*)

Modello cinematico di Wald, Heaton, 1996

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
17/01/1994	California,			34.344	-118.515	19.4
<b>Mw=6.69</b>	<b>Mo=1.22e+19</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Northridge	-118.515	34.344	19.4	18.0x24	122	40

Gli autori propongono un modello multiwindows con tre funzioni sorgenti triangolari. Il modello cinematico deriva dall'uso in combinazione di dati strong motion, dati telesismici e dati GPS. La velocità di rottura è assunta costante pari a 3.0km/s. La

rottura ha inizio ad una profondità di 17.5km e si propaga mediamente lungo la direzione definita dal vettore di rake, ovvero in media pari a  $101^\circ$ . Lo slip termina ad una profondità di circa 6km, la faglia non raggiunge la superficie. La rottura si propaga per 15km nella direzione di strike e 20km nella direzione dip. Lo slip massimo si verifica a circa 12 km a nord dell'ipocentro, e raggiunge un valore pari a 3m (nel modello interpolato lo slip massimo è pari a 3.3).

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante.

Dimensione della sottofaglia: 1.7 km x 1.29 km
Numero di sottofaglie: 14 x 14
Dimensioni: 24 km x 18 km
Ipocentro: $x_{hyp}=15.0$ km, $y_{hyp}=19.4$ km
STF: Triangolo
Numero di finestre temporali: 3
Risetime: .0.6s
Intervallo tra finestre successive: overlap di 0.2s
Velocità di rottura 3.0 km/s
Rake: $101^\circ$ thrust blind

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 km x 0.25 km
Numero di sottofaglie: 99x72x538
Intervallo temporale dta (s): 0.02s
Running mean: 0.6

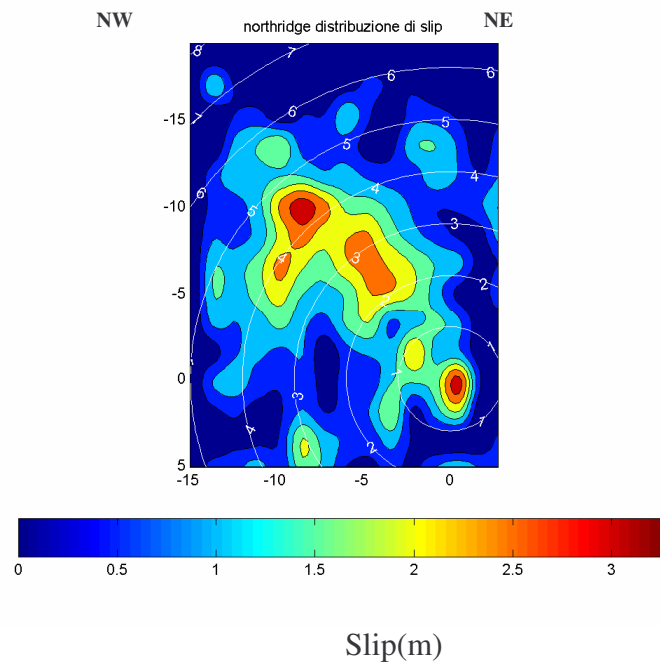
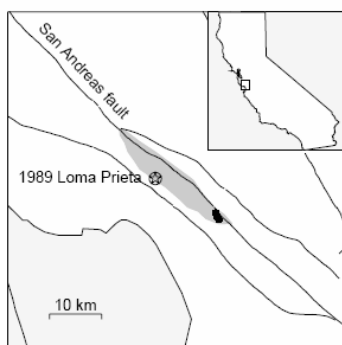


Figura 3.9: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Northridge (1994)

### 3.1.9 Morgan Hill



L'evento sismico (6.25Mw) ha luogo il 24 aprile 1982, alle ore 21:15:18 UTC vicino la monte Hamilton, a 16 km a est da San Jose, Santa Clara, vicino al punto di giunzione della faglia di Calaveras e della faglia di Hayward. Gli aftershock si propagano lungo la faglia di Calaveras per circa 5km verso NW e 25 km SE dell'ipocentro, e la loro

distribuzione suggerisce che la rottura si sia propagata principalmente in un'unica direzione, verso SE, con un immersione di  $85^\circ$  a NE. La durata del terremoto è di circa 10s.

L' epicentro è collocato a 37.317° di latitudine N e 121.682° di longitudine W, ad una profondità di 8.50 km nel modello di Beroza e Spudich, 1988. (Figura tratta da: *Morgan P.Shaff, Beroza, 1998*)

Modello cinematico di Beroza, Spudich (1988)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
24/04/1984	California			37.317	-121.682	8.50
<b>Mw=6.25</b>	<b>Mo(Nm)=2.62e+18</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Calaveras fault	-121.682	37.317	8.50	30x10	330	85

Gli autori propongono un modello single windows in cui si assume che un punto possa dislocare solo una volta al passaggio del fronte di rottura. La funzione sorgente è un Kostrov di rise time molto breve, pari a 0.2s. Lo slip sul piano di faglia è fortemente eterogeneo, gran parte della faglia presenta una dislocazione molto piccola, la rottura si propaga principalmente nella direzione strike generando una zona di slip rilevante nei primi 10km, quindi produce una zona di massimo slip superiore ai 2m.

Il modello maggiormente in accordo con le simulazioni numeriche è quello in cui la velocità di rottura è variabile, ovvero il fronte di rottura non si propaga uniformemente dall'ipocentro. Il risultato di questa inversione mostra che il fronte di rottura incontra una zona di resistenza a circa 13km dall'ipocentro in direzione SE (ovvero il fronte di rottura procede più lentamente in tale zona), quindi successivamente disloca e genera la zona di massimo slip. Questo comportamento, insieme alla constatazione che la regione è interessata da scarsi episodi di sismicità intersismica, porta alla conclusione che questa parte della faglia possa rappresentare un'asperità.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante:

Dimensione della sottofaglia: 1.0 x0.5 (km)
Numero di sottofaglie:11x61
Dimensione faglia:10 km x30 km
Ipocentro:xhyp=5 km, yhyp=6.50 km
STF:Kostrov
Numero di finestre temporali: 1
Risetime: 0.2 sec
Intervallo tra finestre successive:
Velocità di rottura: variabile
Rake: 180° right strike slip

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.08 km x 0.08 km
Numero di sottofaglie: 125 x375 x1410
Intervallo temporale dta (s): 0.008s
Running Mean: 0.16 s

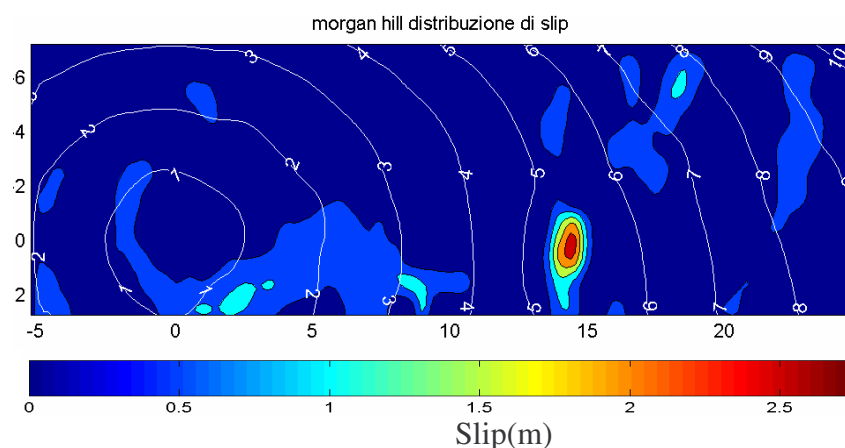
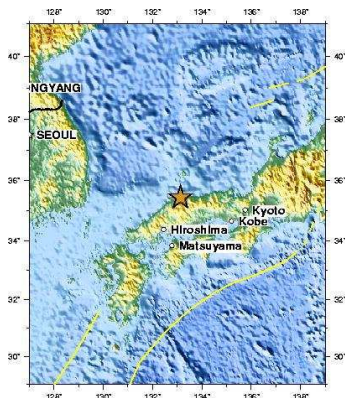


Figura 3.10: La distribuzione dello slip e i tempi di rottura per il terremoto Morgan Hill (1982)



### 3.1.10 Tottori

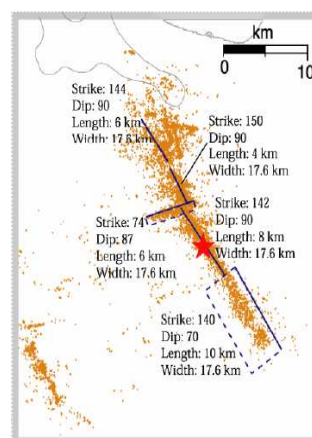


L'evento, (6.6Mw) ha luogo il 6 ottobre 2000 alle 04:30:19 UTC a ovest della prefettura di Tottori a 30 km NW di Matsue, Shimane. Il meccanismo focale mostra che l'evento principale avviene con meccanismo strike slip, mentre la distribuzione degli aftershocks suggerisce una fagliazione laterale sinistra nella direzione NW-SE.

La rottura si propaga su 15 segmenti individuali di faglia ma l'evento principale coinvolge solo tre segmenti siti a sud della regione che è anche il luogo dove sono concentrati gli aftershock principali. L'ipocentro è collocato a 35.269° di latitudine N, 133.357° longitudine E. Per questo terremoto consideriamo due modelli, quello di Sekiguchi et al. (2003) che pone l'ipocentro ad una profondità di 7.80 km e il modello di di Piatanesi et al. (2004) che lo colloca a 14 km di profondità.

Quest'ultimo utilizza tre funzioni sorgente differenti e diverse velocità di rottura.

(Figura in alto tratta da: *USGS web page*; Figura a destra tratta da: *Sekiguchi et al, 2003*).



#### Modello cinematico di Sekiguchi (2003)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
06/10/2000	Japan			35.269N	133.357E	7.80
<b>Mw=6.80</b>	<b>Mo(Nm)=19e+018</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Calaveras fault	133.357E	35.269N	7.80	28x17.6	150	87

Gli autori propongono un modello multiwindows con 6 triangoli della durata di 1s separati temporalmente di 0.5s. La rottura si propaga dall'ipocentro in direzione SE con velocità costante pari a 1.9 km/s. La zona di slip maggiore è in direzione della propagazione della rottura e raggiunge e supera i 5m di dislocazione (il modello interpolato determina un valore massimo di slip pari a 5.4m). La durata dell'evento è di circa 8s.

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante:

Dimensione della sottofaglia: 2.2x2.0 (Km)
Numero di sottofaglie: 8x14
Dimensioni faglia: 17.6 km x 28 km
Ipocentro: xhyp=15.0km, yhyp=7.7km
STF: triangoli
Numero di finestre temporali: 6
Risetime: 1s
Intervallo tra finestre successive: 0.5s
Velocità di rottura: 1.9 km/s
Rake: 180° right strike slip

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing:

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 km x 0.25 km
Numero di sottofaglie: 71x113x755
Intervallo temporale dta (s): 0.02s
Runnig mean: 0.5 s

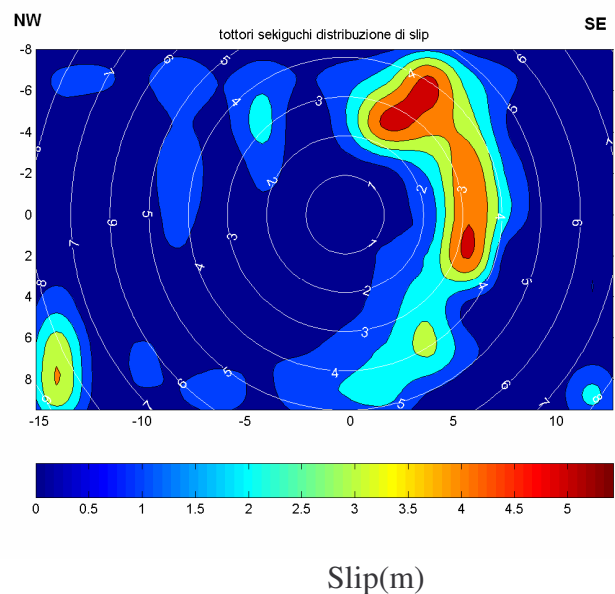


Figura 3.11 La distribuzione di slip e i tempi di rottura per il modello di Tottori (2000) proposto da Sekiguchi et al. (2003)

Modello cinematico di Piatanesi et al., 2004 modello 00/01 (2003)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
06/10/2000	Japan			35.269N	133.357E	14
Mw=6.80	Mo(Nm)=1.158e+019 Mo(Nm)=1.195e+019					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Calaveras fault	133.357E	35.269N	14	32x20	150	87

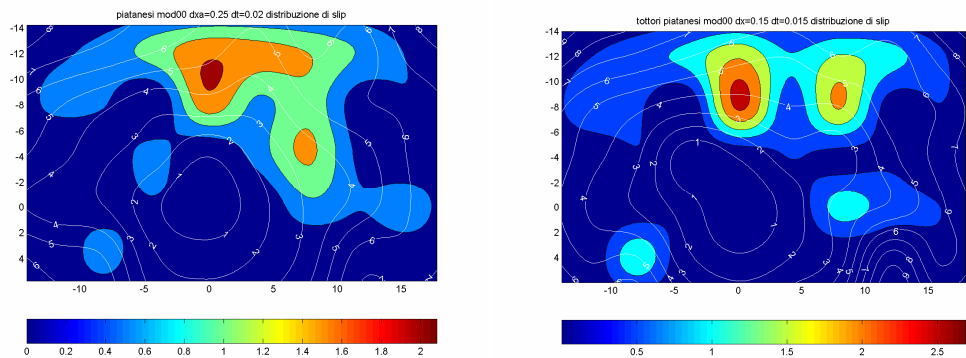
Gli autori propongono diversi modelli per Tottori, in ognuno dei quali è descritta la propagazione della rottura con un approccio single window e una funzione sorgente iperbolica (tanh). In questo studio utilizziamo il modello 00 e il modello 01 con velocità di rottura variabile (le cui velocità media risultano 2.4 km/s e 2.7 km/s rispettivamente).

Il modello è riassunto nelle sue parti essenziali nello schema sottostante:

Dimensione della sottofaglia: 2.0x2.0 (Km)
Numero di sottofaglie:10x16
Dimensioni: 20 km x32 km
Ipocentro:xhyp=14.0km, yhyp=14.0km
STF: tanh
Risetime: variabile
Velocità di rottura: variabile

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell’interpolazione e dell’eventuale smoothing:

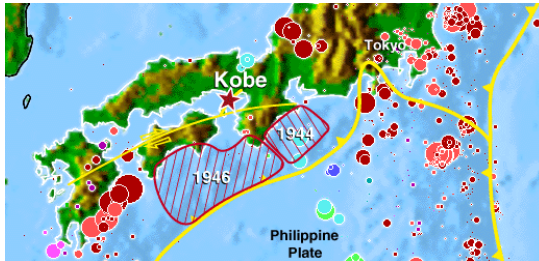
<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 km x 0.25 km
Numero di sottofaglie: 81x129x900
Intervallo temporale dta (s): 0.02s



Slip(m)

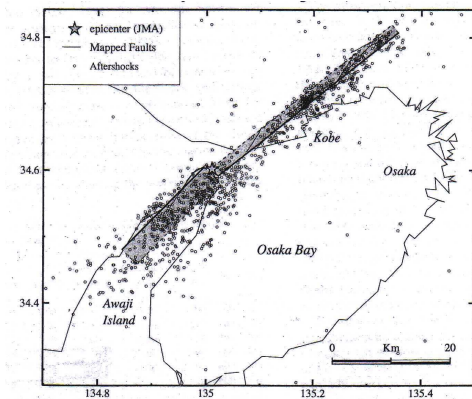
Figura 3.12 La distribuzione di slip e i tempi di rottura per i due modelli di Tottori proposti da Piatanesi et al.

### 3.1.11 Kobe



Le aree segnate in rosso mostrano la parte della faglia in subduzione che ha prodotto gli eventi sismici del 1994 e del 1946.

L'evento sismico ha luogo a ovest delle isole Honshu, il 17 gennaio 1995, alle ore 20:46:52 UTC, nei pressi della zona di intersezione delle tre placche tettoniche: quella pacifica, quella eurasiatica, quella delle filippine; questa è anche la zona della linea tettonica mediana, dove le faglie originano eventi sismici principalmente con meccanismo strike - slip.



Il terremoto è di magnitudo 7.2 Mw, di durata complessiva di circa 20s, ipocentro poco profondo collocato in  $34.58^\circ$  di latitudine N, e  $135.01^\circ$  di longitudine E. La distribuzione degli aftershocks mostra che la faglia taglia la parte nord delle Awaji Island (Nojima fault) e si spinge verso la Honshu coast direttamente verso

la città portuale, Kobe (Rokko fault).

La scarsa profondità dell'ipocentro e la vicinanza con uno dei porti più attivi della regione ha reso l'evento particolarmente devastante in termini di danni alle strutture e di vite umane.

(Figura in basso tratta da: *USGS*, [www.seismo.unr.edu/.../100/effects-kobe.html](http://www.seismo.unr.edu/.../100/effects-kobe.html), in basso da: *D. Wald, 1996 J. Phys. Earth, 44, 489-503*)

Modello cinematico di J.Wald (1996)

La dislocazione è determinata attraverso l'uso combinato dei dati sismici, telesismici e geodetici prodotti dal terremoto. La faglia presenta due segmenti, la faglia Nojima e la faglia Rokko, la prima nelle vicinanze di Kobe la seconda sotto le isole Awaji.

Si semplifica il modello riducendolo ad un'unica faglia di lunghezza complessiva pari a 60km che non presenta sovrapposizione. Il modello di rottura è un multiwindows costituito da 6 triangoli isosceli, la velocità è costante e pari a 2.8 km/s. La dislocazione risulta distribuita al 40% in direzione NE dell'epicentro nei pressi di Kobe dove raggiunge il valore massimo di circa 1m, il restante 60% si spinge sotto le isole Awaji e a profondità minori tra 0-10km dove la dislocazione raggiunge il massimo valore di slip pari a circa 3m.

Il modello indica che il moto del suolo che ha danneggiato gravemente la zona della città portuale di Kobe è stato prodotto dalla dislocazione avvenuta in profondità sulla faglia Nojima dove lo slip risulta tuttavia relativamente più basso. Il motivo è legato all'effetto della direttività e dell'intensità della radiazione e all'amplificazione del sito.

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
17/01/1995	Giappone			34.58N	135.01E	2.8
<b>Mw=6.9</b>	<b>Mo(Nm)=2.4e+019</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Nojima	134.92	34.543	2.8	20x20	45	80
Rokko	135.19	34.7	2.8	40x20	230	85

Qui di seguito riportiamo le caratteristiche dell'interpolazione e dell'eventuale smoothing

Dimensione della sottofaglia: 2.5x3.3 (Km)
Numero di sottofaglie: 10x20
Dimensioni faglia 20 km x60 km
Ipocentro:xhyp=20.0 km, yhyp=17.0 km
STF:triangolo
Numero di finestre temporali: 6
Risetime: 0.7s
Intervallo tra finestre successive: 0.4s
Velocità di rottura:2.8
Rake: 135°,225°

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.25 x 0.25
Numero di sottofaglie: 80x240x989
Intervallo temporale dta (s): 0.02s
Runnig mean:0.5 s

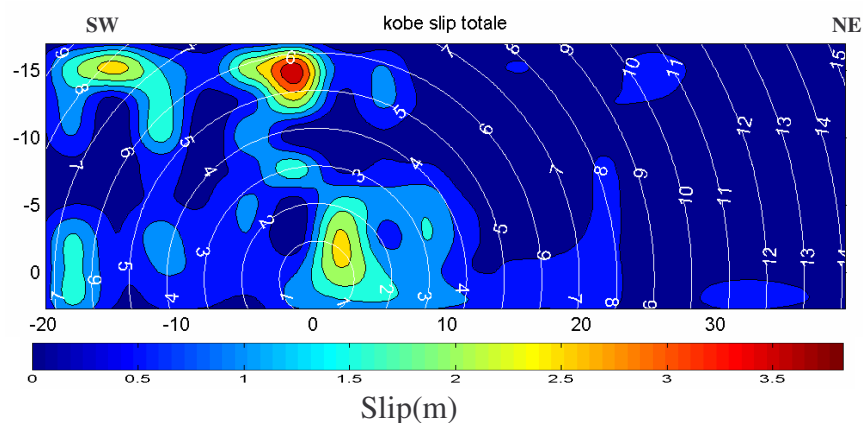


Figura 3.13 La distribuzione di slip e i tempi di rottura per il modello di Kobe(1995) proposto da J.Wald (1996)

### 3.1.12 Colfiorito

La storia sismica del 1997 che caratterizza la parte nord degli appennini a confine tra la regione delle Marche e dell' Umbria, è costituita da una sequenza di 6 eventi di magnitudo maggiore di 5.0Mw e più di 2000 aftershocks che si verificano nell'arco di circa 20 giorni. I tre eventi principali si verificano tra il mese di settembre e quello

di ottobre, durante i quali avviene il rilascio di quasi la totalità del momento sismico. La sequenza principale ha luogo il 26 settembre 1997, con un evento verificatosi alle 00.33 di magnitudo 5.7Mw e un secondo evento verificatosi alle ore 09.40 di magnitudo 6.0Mw; il 14 ottobre 1997 un' altro evento significativo si verifica alle 15.23 (ora locale) di magnitudo 5.6Mw. Il primo evento è caratterizzato da rottura in direzione SE con meccanismo di fagliazione di tipo normale in immersione in direzione SW. Il secondo rompe in direzione NW producendo due segmenti di faglia ben distinti che si immergono in direzione SW. Il terzo evento si sviluppa nella sezione SE della zona sismogenetica, vicino Sellano. Le coordinate dei rispettivi ipocentri sono riportate nella tabella seguente.

	Lon	Lat	Depth
00.33	12.53	43.01	6.6
09.40	12.51	43.01	5.7
14/10 15:23	12.55	42.55	6.6

Il 'trend' sismico, considerando gli eventi precedenti, a Norcia, 1979 (5.7M) e Gubbio, 1984 (5.3M), segue la parte a nord della catena appenninica. (Figura tratta da: *Mirabella et al., 2005, Geological Society, London, Special Publications, 243, 25-36*)

#### Modello cinematico di Hernandez et al.,2004

L'evento sismico del 1997 a Colfiorito (Umbria – Marche ) è caratterizzato da una sequenza di 6 scosse registrate nell'arco di un mese i cui si riconoscono tre eventi principali: due del 26 settembre 1997 rispettivamente alle ore 00.33 e 09.40, un altro registrato alle 15.23 del 14 ottobre 1997. Il terremoto delle ore 00.33 presenta una zona di slip singola vicina all'ipocentro di slip massimo pari a 0.9m (modello interpolato). La rottura si propaga in direzione SE con velocità di rottura variabile.



Data	Luogo			Rake		
26/09/1997 14/10/1997	Italia, Umbria-Marche					
<b>Mw(00.33)=5.7</b> <b>Mw(09.40)=6.0</b> <b>Mw(14/10)=5.6</b>	<b>Mo(Nm)=4.381e+17</b> <b>Mo(Nm)=1.039e+18</b> <b>Mo(Nm)=6.478e+17</b>			-77 -75 -90		
	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
00.33	12.53	43.01	6.6	7.5x7.5	154	46
09.40	12.51	43.01	5.7	12.5x7.5	138	45
14/10 15:23	12.55	42.55	6.6	8x5.5	135	45

L'evento delle 09.40 si propaga in direzione NW e presenta una patch di slip vicina all'ipocentro e un'altra all'angolo N della faglia, a circa 10 km dall'ipocentro.

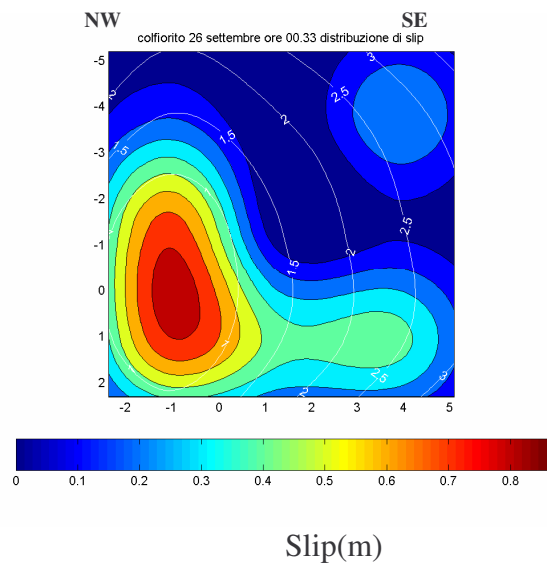
La scossa del 14 ottobre presenta un patch di slip singola sita nella zona NE della parte inferiore della faglia. La velocità di rottura è variabile sul piano di faglia, i tempi di rottura sono riportati nelle figure rispettive.

Il modello è di tipo single windows, la funzione sorgente è una tangente iperbolica di rise time pari a 1s.

#### Modello cinematico di Hernandez et al. 26/09/1997 00.33

Dimensione della sottofaglia: 2.5x2.5(Km)
Numero di sottofaglie: 3x3
Dimensioni faglia: 7.5 km x 7.5 km
Ipocentro: xhyp=2.4 km, yhyp=5.2 km
STF: tanh
Risetime: variabile
Velocità di rottura: 2.3
Rake: -75

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.1 km x 0.1 km
Numero di sottofaglie: 76x76x600
Intervallo temporale dta (s): 0.01s

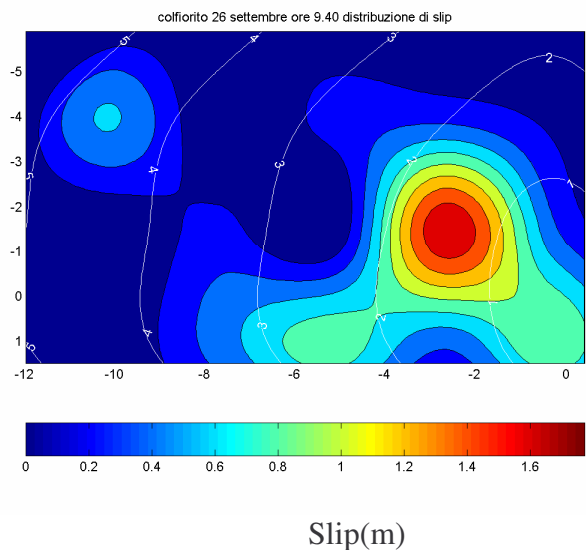


**Figura 3.14** La distribuzione di slip e i tempi di rottura per il modello di Colfiorito, evento delle ore 00.33 26 settembre 1997, proposto da Hernandez et al. 1997

Modello cinematico di Hernandez et al. 26/09/1997 09.40

Dimensione della sottofaglia: 2.5x2.5(Km)
Numero di sottofaglie: 3x5
Dimensioni faglia:7.5 km x12.5 km
Ipocentro:xhyp=11.9 km, yhyp=5.8 km
STF:tanh
Risetime: variabile
Velocità di rottura:2.2
Rake: -77

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.1 km x 0.1 km
Numero di sottofaglie: 75x125x600
Intervallo temporale dta (s): 0.01s



**Figura 3.15** La distribuzione di slip e i tempi di rottura per il modello di Colfiorito, evento delle ore 09.40 del 26 settembre 1997, proposto da Hernandez et al. 1997

Modello cinematico di Hernandez et al. 14/10/1997 15:23

Dimensione della sottofaglia: 1.5x1.5(Km)
Numero di sottofaglie: 4x6
Dimensioni faglia:5.5 km x 8 km
Ipocentro:xhyp=3.0 km, yhyp=4.5 km
STF:tanh
Risetime: variabile
Velocità di rottura:1.8
Rake: -90

<u>Modello interpolato</u>
Dimensione della sottofaglia: 0.1 km x 0.1 km
Numero di sottofaglie: 60x90x600
Intervallo temporale dta (s): 0.01s

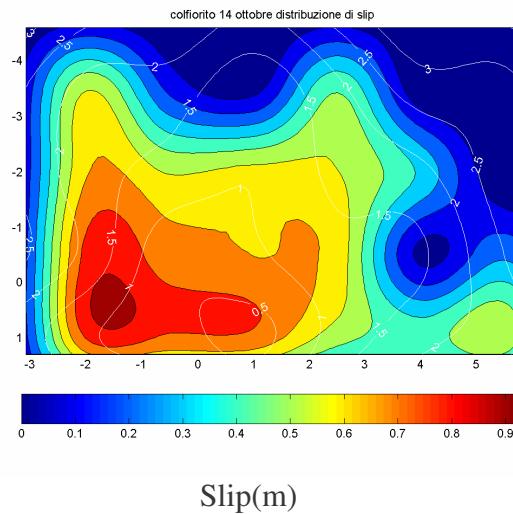
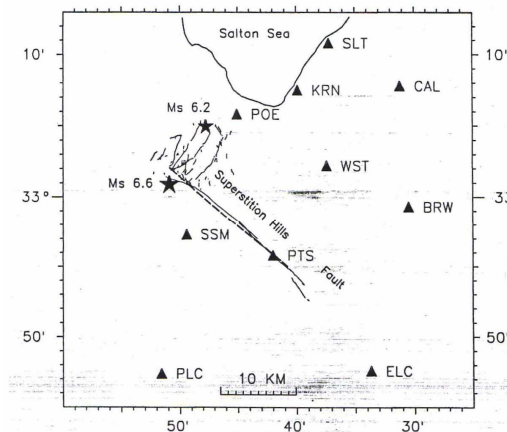


Figura 3.16 La distribuzione di slip e i tempi di rottura per il modello di Colfiorito, evento delle ore 15.30 del 14 ottobre 1997, proposto da Hernandez et al. 1997

### 3.1.13 Superstition Hills



L'evento sismico ha luogo il 24/11/1987, alle ore 13:15:56 UTC nella parte ovest di Imperial Valley, a 32 km SSE da Salton City, 145 km (90 miles) E da San Diego, e coinvolge la faglia di Superstition Hills e quella di Elmore Ranch. Si registrano 2 eventi in successione, il primo dei quali si

sviluppa sulla faglia di Elmore Ranch di magnitudo 6.2Mw, mentre il più importante, di magnitudo 6.6Mw, si sviluppa sulla faglia di Superstition Hills. Quest'ultimo è visto come un doppio evento, i due essendo di ampiezza in rapporto 1:2 e di distanza temporale di 8s. Il doppietto origina due episodi di slip completi, pertanto l'evento sismico può essere descritto, complessivamente, da tre sottoeventi separati che possono essere trattati come singoli episodi di rottura. I primi due eventi sono

confinanti in un'area piccola intorno all'ipocentro mentre il terzo si propaga per 18km in direzione SW.

Le coordinate dell'ipocentro sono:  $32.973^\circ$  di latitudine N,  $115.763^\circ$  di longitudine W, e profondità di 9.5 km (modello Wald et al, 1990), lo stesso per tutti i sottoeventi. (Figura tratta da: *Wald et al., 1990*)

Data	Luogo			Lat(°) ipo	Lon (°) ipo	Depth(Km) ipo
24/11/1987	California, Sud			32.973	115.763	9.5
<b>Mw=6.5</b>	<b>Mo=6.57e+18</b>					
Segmento	Lon	Lat	Depth	Size(LxW)	Strike(°)	Dip(°)
Supestition Hills				20x11.5	127	90

Il modello tratta i tre eventi in successione utilizzando per ognuno un modello di rottura di tipo multiwindow, con funzione triangolare, ognuna delle finestre separate da 0.5s. Il modello che procura il misfit migliore è quello che attribuisce un intervallo temporale di 8.6s tra i due ultimi episodi e una velocità di rottura pari a 2.4 km/s.

#### Modello cinematico di Wald D. J. (1990)

Dimensione della sottofaglia: 1.0 x 1.5 (Km)
Numero di sottofaglie: 10x20
Dimensioni faglia: 11.50 km x 20 km
Ipocentro: $x_{hyp}=2$ km, $y_{hyp}=9.5$ km
STF: 9 Triangoli, 3 per ogni evento.
Trise=0.5
Intervallo tra finestre successive: 0.5 per ogni finestra temporale;
tra il primo e il secondo gruppo $T_{delay}=2.1$ sec
tra il secondo e il terzo gruppo $T_{delay}=8.6$ sec
Numero di finestre temporali: 9
Velocità di rottura: 2.4 km/s
Rake: $180^\circ$ solo strike

Modello interpolato

Dimensione della sottofaglia: 0.2 km x 0.2 km
Numero di sottofaglie: 58 x100 x1182
Intervallo temporale dta (s): 0.02

### **3.2 Calcolo delle trazioni**

Nel capitolo precedente si è discusso il metodo con il quale vengono calcolate le trazioni sul piano di faglia. In modo schematico ricordiamo che tali trazioni sono derivate dalla risoluzione dell'equazione dell'elastodinamica attraverso una procedura numerica alle differenze finite in cui si è scelto di non imporre un legge costitutiva a priori ma di produrre una relazione tra slip e trazione vincolando la trazione sul piano di faglia attraverso l'assegnazione dell'evoluzione spazio-temporale della dislocazione.

Per ottenere un buon modello cinematico è necessaria la conoscenza della struttura interna della terra, in particolar modo dei suoi parametri elastici e della sua densità. Tale struttura viene semplificata attraverso un modello 1D, a strati paralleli. In prima approssimazione è comunque possibile risolvere il problema dinamico facendo uso di un modello omogeneo; valuteremo le differenze introdotte da un modello che tenga conto della struttura per il terremoto di Morgan Hill.

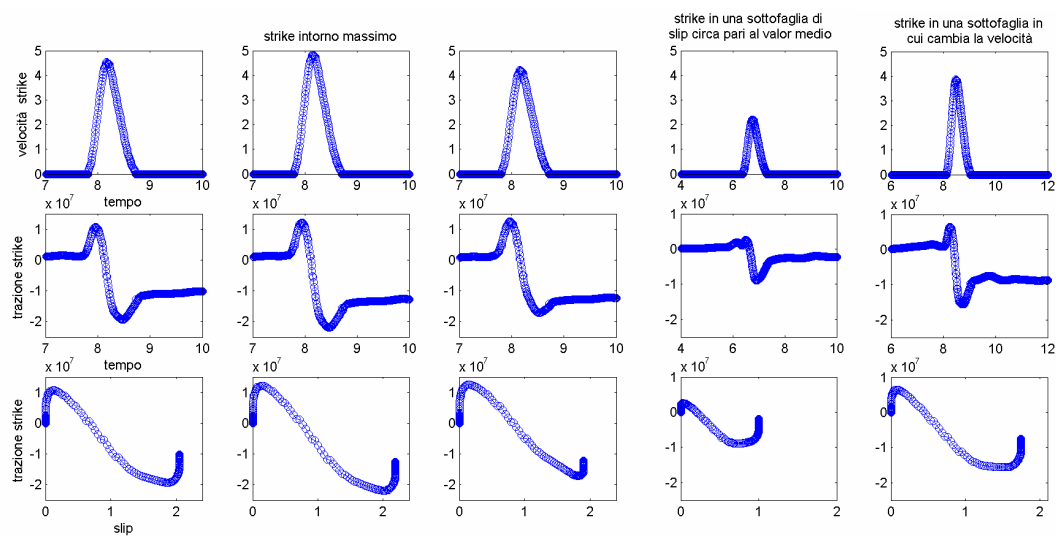
Tutti le trazioni ottenute per ogni terremoto studiato sono riportate in Appendice B. In questo paragrafo riportiamo solo alcuni dei risultati più significativi o esemplificativi.

In Figura 3.17 sono riportati gli andamenti della velocità di slip nel tempo (riga in alto), della trazione nel tempo (riga centrale), e della trazione in relazione allo slip (ultima riga) relativi al terremoto di Imperial Valley (1979).

In figura, le prime tre colonne rappresentano gli andamenti in un intorno della sottofaglia di slip massimo (seconda colonna), e distano da essa di  $5 \Delta y$  lungo la direzione dip.

I cerchietti rappresentano la discretizzazione temporale utilizzata nel modello dinamico ed evidenziano quindi una buona risoluzione temporale.

Quando la trazione crolla dal valore massimo ad un valore minimo la dislocazione accelera e la STF passa da un valore nullo al valore di picco. Il primo tratto della trazione in funzione della dislocazione (terzo riga) mostra inizialmente una fase di hardening, ovvero la trazione cresce senza produrre dislocazione sotto l'effetto della deformazione prodotta dalla dislocazione delle sottofaglie circostanti (ovvero dovuto all'effetto di carico, secondo termine nell'equazione 2.3).



**Figura 3.17** Dall'alto: andamento della velocità di slip nel tempo; andamento della trazione nel tempo; andamento della trazione in rapporto alla dislocazione per tre diverse sottofaglie dell'evento di Imperial Valley (1979)

Il tratto con pendenza negativa, dove la trazione decresce con l'aumentare della dislocazione, è costituito da una successione più distanziata di punti indice del fatto che il passaggio da un valore di tensione al successivo avviene su tempi molto più brevi di quelli che caratterizzano la fase precedente; questa caduta di tensione rappresenta in effetti la fase di instabilità che produce l'evento sismico, ovvero la fase di '*weakening*' (seconda e terza riga della figura).

Successivamente la trazione oscilla intorno ad un valore costante; tale valore è raggiunto nella fase finale del processo ed è visibile più chiaramente nella riga centrale di Figura 3.17. Si può chiaramente distinguere, sempre nella riga centrale, lo stress drop dinamico dallo stress drop statico. Il primo rappresenta la variazione della

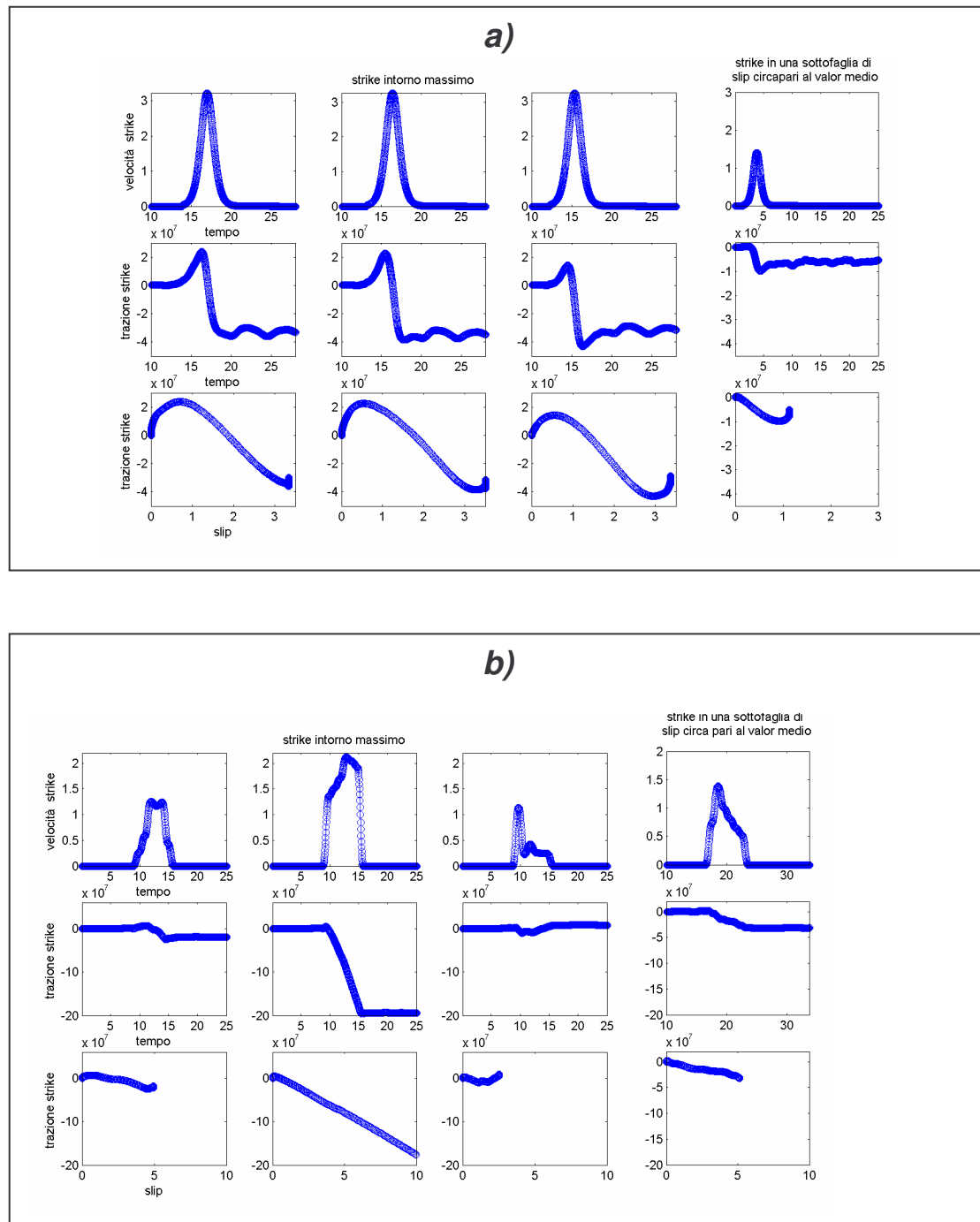
trazione dal valore iniziale al valore di minimo raggiunto durante la dislocazione, il secondo rappresenta la variazione della trazione dal valore iniziale al valore costante raggiunto dopo che la sottofaglia si è arrestata (ha cicatrizzato). Il primo risulta di ampiezza maggiore rispetto al secondo. La rapidità, in termini temporali, in cui viene raggiunto il valore minimo di trazione e il valore stesso dipendono fortemente dal tipo di funzione sorgente scelta, ovvero dalla sua forma, dalla durata e dal picco della velocità. In questa figura è inoltre evidente come la caduta della trazione avvenga durante quasi tutta la durata dello slip, ovvero il valore critico di slip,  $D_c$ , è una frazione molto grande dello slip totale relativo ad ogni sottofaglia.

È importante puntualizzare che le trazioni così determinate rappresentano un andamento locale, ovvero caratterizzano la singola sottofaglia, pertanto la fase terminale dell'andamento della trazione rappresenta la fase di arresto nella specifica sottofaglia. Il modello cinematico impone tale arresto a priori, assumendo una STF di durata finita. Solitamente tale durata (rise time) è di gran lunga inferiore alla durata dell'intero evento, per cui il modello dinamico che ne risulta è un modello ad "impulso" che si propaga piuttosto che un modello "a crack". Poiché il codice alle differenze finite utilizzato non ha la condizione di bordi assorbenti, si osservano effetti di riflessione al limite del volume modellato che perturbano lo stato di stress nella fase finale del processo di rottura.

Questa condizione in alcuni modelli non permette di studiare in dettaglio l'andamento della trazione nella parte finale del processo.

In Figura 3.18 sono riportati gli andamenti per Landers (1992) nel caso di due modelli cinematici diversi: nel pannello (a) il modello di Hernandez et al.(1999), nel pannello (b) il modello di Wald e Heaton (1994). Il modello multiwindow di Wald prevede che uno stesso punto possa dislocare più volte anche in seguito al passaggio del fronte di rottura. Pertanto l'andamento della slip velocity risulta fortemente irregolare rispetto al modello di Hernandez, irregolarità che si rispecchia nei valori assunti dalla trazione. Nella sottofaglia con slip massimo (seconda colonna di entrambi i pannelli) lo stress drop descritto dal modello di Wald è di un ordine di grandezza superiore a quello previsto dal modello di Hernandez (rispettivamente  $1.9 \times 10^8$ ,  $3.8 \times 10^7$ ), e lo slip massimo raggiunge il valore di 10.7m contro i 7.0m.



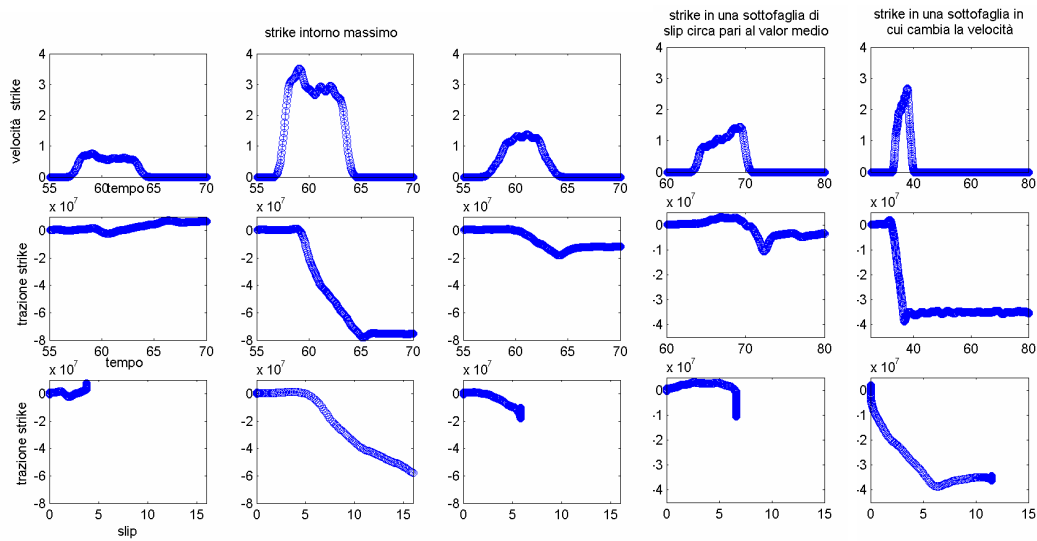


**Figura 3.18:** Dall'alto: andamento della velocità di slip nel tempo; andamento della trazione nel tempo; andamento della trazione in rapporto alla dislocazione. Pannello a: Landers, modello di Hernandez (1999), Pannello b: Landers modello di Wald e Heaton (1994)

E' interessante notare il fatto che nel modello di Wald, la sottofaglia in cui lo slip è massimo si trova in una patch isolata rispetto alle altre circostanti, che mostrano una dislocazione molto minore, come riportato in figura (prima colonna e terza colonna pannello b) in cui le sottofaglie si trovano a una distanza di 2km ( $5 \Delta y$ ) da essa questo potrebbe spiegare il motivo per cui lo stress drop del modello di Wald raggiunge valori più alti, e il motivo per cui l'andamento della trazione sembra essere del tutto differente rispetto agli andamenti delle sottofaglie vicine. Nel modello di Hernandez le sottofaglie rappresentate fanno ancora parte della stessa patch (si tratta delle sottofaglie che si trovano a  $5 \Delta y$  da essa), lo stress drop assume lo stesso valore nell'arco di 1.25km e anche la dislocazione è simile. Guardando l'andamento della trazione nel caso del modello di Wald si potrebbe avanzare l'ipotesi che la patch singola sia circondata da zone di alta resistenza, ipotesi che potrebbe essere confermata dal fatto che l'andamento della trazione nella sottofaglia a slip massimo non presenta strength excess, fenomeno legato al carico prodotto dalla dislocazione delle faglie circostanti. Nel modello di Hernandez la sottofaglia di slip massimo si trova collocata in una patch estesa, pertanto la dislocazione delle sottofaglie circostanti produce una fase di hardening evidente.

Una differenza importante tra i due modelli è la velocità di rottura che caratterizza l'evento. La velocità di rottura in generale dipende dalla struttura del mezzo in cui si propaga la dislocazione. Il fronte avanza aggirando o saltando le zone di resistenza, rompendo le barriere e le asperità quando la deformazione che lo accompagna è superiore al valore di resistenza alla rottura. Il modello di Hernandez prevede una velocità di rottura variabile. Il modello di Wald propone una velocità di rottura costante e descrive l'eterogeneità temporale dello slip attraverso la scelta di un modello multiwindows che tenga conto del fatto che particolari condizioni strutturali possono portare il punto a dislocare in ritardo, in modo eterogeneo e più volte nel corso dell'evento.

Questo è una chiara manifestazione del fatto che l'inversione cinematica può produrre modelli simili da un punto di vista cinematico ma molto diversi da un punto di vista dinamico (Guatteri e Spudich, 2000).



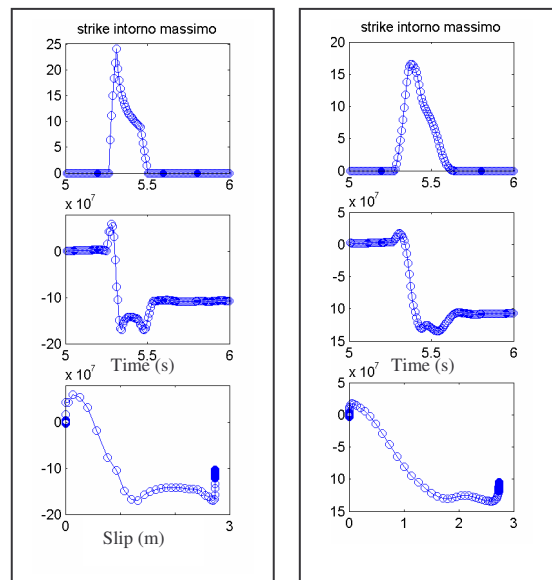
**Figura 3.19** Dall'alto: andamento della velocità di slip nel tempo; andamento della trazione nel tempo; andamento della trazione in rapporto alla dislocazione. A sinistra: andamento in un punto diverso dal massimo; A destra; andamento nella patch di massimo slip. Caso di Denali (2002).

In figura 3.19 è riportato l'andamento della trazione nella zona di massimo slip (pannello a destra) e in sottofaglie site in una zona differente dalla patch di slip massimo (pannello a sinistra) per il terremoto di Denali (2002). Si è scelto di mostrare gli andamenti in sottofaglie che si trovano alla stessa profondità per escludere che un comportamento anomalo possa essere dovuto all'effetto della stratificazione.

La seconda colonna mostra l'andamento della trazione nella sottofaglia di slip massimo: nel caso di Denali la dislocazione ha un elevato valore di rise time. Questa condizione influenza e contribuisce notevolmente all'andamento della trazione nei punti circostanti creando uno stato di sforzo che rende di difficile interpretazione l'andamento nelle sottofaglie vicine. Ad esempio la figura posizionata nella seconda riga e prima colonna mostra un andamento particolare della trazione nel tempo; essa presenta una piccolissima fase di weakening, di breve durata rispetto alla durata del terremoto (90s) e una successiva fase di risalita della tensione attribuibile al contributo della trazione delle sottofaglie vicine. In questo modello si è fatto uso di una velocità di rottura costante che assume due valori diversi a 80km lungo lo strike. La quinta colonna rappresenta gli andamenti in una sottofaglia collocata in tale zona:

la velocità cresce da 2.8 km/s a 3.6 km/s e la tensione crolla con pendenza molto diversa rispetto alla situazione illustrata nella sottofaglia di massimo.

In figura 3.20 sono riportati gli andamenti della velocità di dislocazione e della trazione per il terremoto di Morgan Hill (1982). La STF utilizzata dagli autori è una funzione Kostrov troncata di rise time molto breve e tale durata si riflette sulla rapidità del processo di caduta della trazione (breakdown process) come descritto nell'andamento della trazione nel tempo e rispetto alla dislocazione (seconda e terza riga).



**Figura 3.20 Dall'alto: andamento della velocità di slip nel tempo; andamento della trazione nel tempo; andamento della trazione in rapporto alla dislocazione. A sinistra: Morgan Hill modello omogeneo e running mean pari a 0.07. A destra esempio di modello omogeneo con running mean pari a 0.16.**

Un risultato interessante è l'effetto della running mean sulla funzione Kostrov, che risulta originariamente singolare sia al crack tip sia nell'istante in cui viene troncata per ottenere un rise time finito (fase di cicatrizzazione). Tinti et al. 2005 usano una running mean pari a 0.16s (figura a destra). Qui si è usata una running mean di 0.07 (figura a sinistra). La differenza è illustrata dal confronto delle due figure: la fase di accelerazione prima del picco ha una durata maggiore nel modello di Tinti et al.(2005) ed è per questo motivo definita in molti punti, sebbene la discretizzazione

temporale utilizzata sia la stessa. La slip velocity ottenuta con una più piccola running mean (figura a sinistra) mostra però una forma molto più simile alla funzione di Kostrov originale e un valore di picco molto più elevato rispetto al modello di Tinti et al (2005).

Queste differenze in velocità di spostamento si ritrovano poi anche nell'evoluzione temporale della trazione (seconda riga) e negli andamenti costitutivi (terza riga) della figura 3.20.

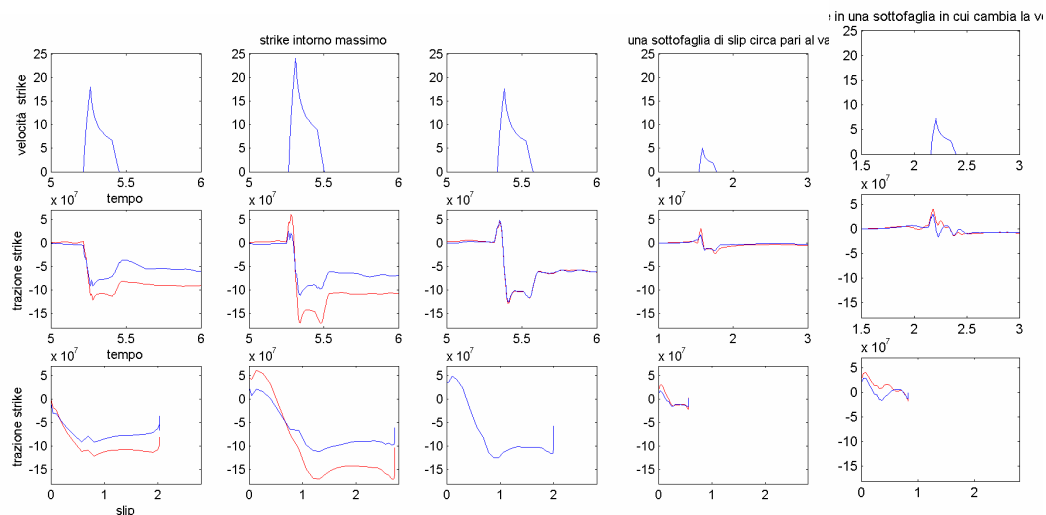
La caduta della trazione nel nostro modello risulta più rapida e l'ampiezza dello stress drop dinamico risulta maggiore. In entrambi i modelli la fase di weakening è lineare anche se con diversa pendenza; per questo motivo il valore di slip critico ( $D_c$ ) risulta diverso tra i due modelli, più grande nel modello di Tinti et al. (2005). Questo risultato mostra come la slip velocity sia fortemente influente nell'evoluzione della trazione.

Anticipiamo di seguito un risultato molto importante: Gustteri e Spudich (2000) dimostrano che l'energia di frattura, che qui indichiamo con  $E_b$ , è un parametro indipendente dal tipo di funzione scelta, in particolare dalla running mean utilizzata per effettuare l'operazione di smoothing. In tabella 2 sono riportati tali valori: con  $W_b$  si è indicata la densità di energia sulla faglia, con  $stress$  si è indicato lo stress drop dinamico, con  $strength$  lo strength excess. Nella prima riga sono riportati i valori risultanti dal modello di Tinti et al. (2005) nella seconda i valori risultanti dal nostro modello. Questo risultato, come vedremo, è di fondamentale importanza perché rende valida una stima dell'energia spesa nel processo di frattura a prescindere dalla non unicità dei parametri dinamici. In questo caso, sebbene il  $D_c$  sia fortemente differente l'energia media varia di poco.

Modello di Tinti et al. 2005					
Wb(J/m <sup>2</sup> )	We(J/m <sup>2</sup> )	Eb(J)	Ee(J)	stress(Pa)	strength(Pa)
1.35e+006	1.43e+006	4.09e+014	4.32e+014	7.06e+006	6.04e+006
Modello elaborato nel presente studio					
Wb(J/m <sup>2</sup> )	We(J/m <sup>2</sup> )	Eb(J)	Ee(J)	stress(Pa)	strength(Pa)
1.89e+006	2.07e+006	5.74e+014	6.28e+014	9.11e+006	1.02e+007

**Tabella 2: Confronto dei paramentri stimati nei due modelli. In alto, Modello di Tinti et al. (2005); in basso il modello proposto in questo studio.**

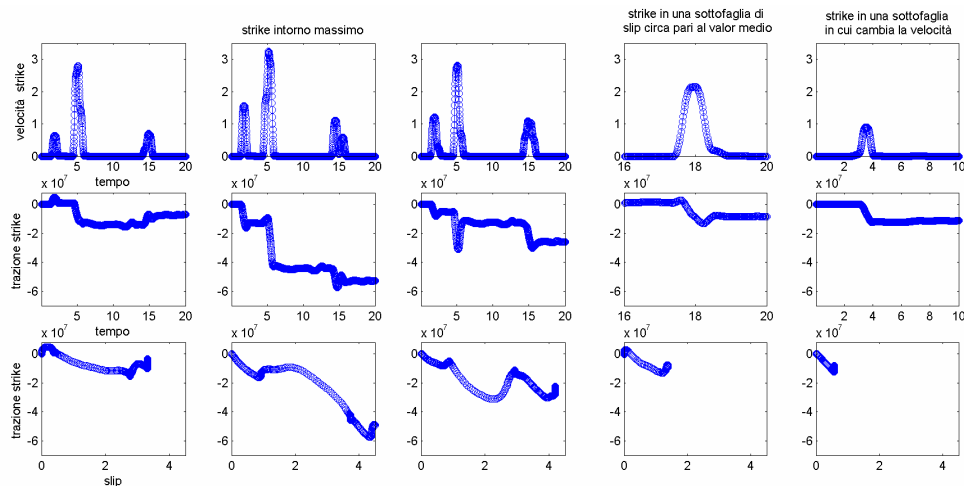
Per questo terremoto si è scelto di confrontare la trazione ricavata da un modello a struttura 1D e da un modello omogeneo, allo scopo di valutare gli effetti introdotti dalla stratificazione.



**Figura 3.21: Confronto tra modello con struttura (blu) e modello omogeneo (rosso).**

In figura 3.21 sono riportati gli andamenti del modello con struttura (blu) e del modello omogeneo (rosso). L'effetto dell'introduzione della stratificazione è ben visibile: l'andamento si diversifica in ampiezza ma anche nella forma. La differenza più evidente risulta nell'ampiezza della caduta di sforzo (sia lo stress drop dinamico che il breakdown stress drop). Quest'ultimo effetto può essere valutato in base

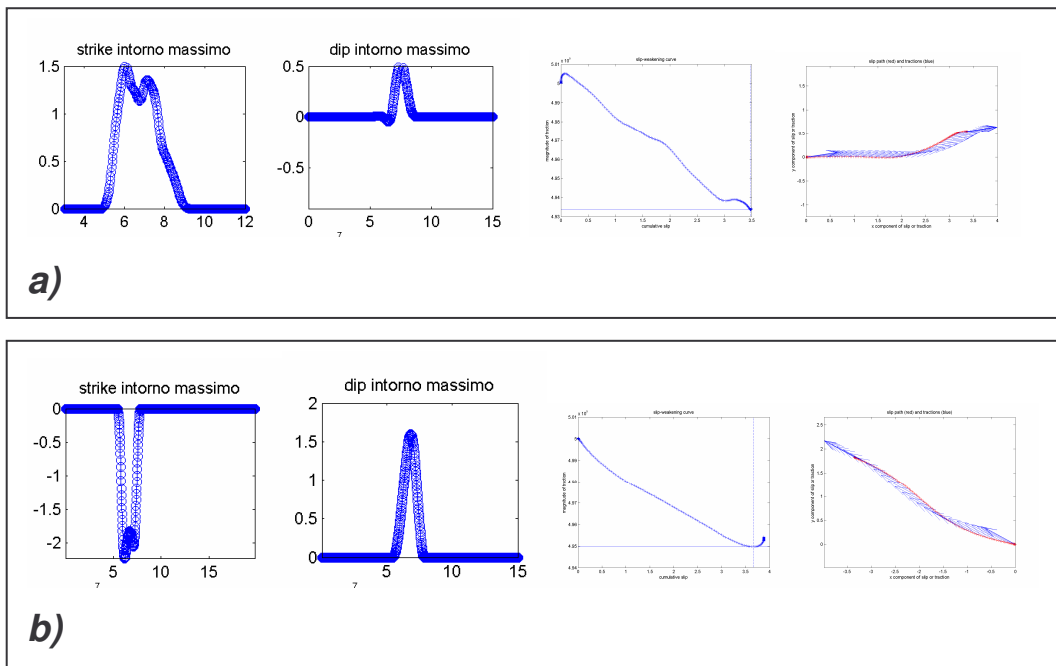
all'equazione (2.3) poiché entrambi i termini, il contributo locale e il carico dei punti circostanti, dipendono dalle caratteristiche del mezzo. Valuteremo gli effetti introdotti da un modello con struttura nel capitolo successivo. Nonostante questa variazione, il  $D_c$  risulta uguale in entrambi modelli poiché la velocità di slip è sempre la stessa.



**Figura 3.22:** Dall'alto: andamento della velocità di slip nel tempo; andamento della trazione nel tempo; andamento della trazione in rapporto alla dislocazione. Superstition Hills

In figura 3.22 si è scelto di mostrare ad esempio il modello di Superstition Hills, caratterizzato da tre eventi distinti in successione, descritti ognuno attraverso STF triangolari (Wald et al. 1990), separate le prime due da un intervallo temporale pari a 2.1s, le ultime due da 8.6s. E' evidente come l'andamento della trazione sia influenzato dalla scelta della funzione sorgente. Un andamento come quello in figura 3.22 rappresenta, in prima analisi, il problema descritto da Piatanesi et al., 2004 della forte dipendenza dei parametri dinamici dalla scelta della source time function. In particolare, l'eterogeneità della slip velocity si riflette sull'andamento della trazione il quale può discostarsi dall'andamento weakening rendendo difficoltoso il calcolo di importanti parametri dinamici, come il breakdown stress drop e la dislocazione critica  $D_c$ .

Di seguito riportiamo l'andamento della trazione, quando si tenga conto delle due componenti simultaneamente prendendo ad esempio il terremoto di Fukuoka (pannello a) e di Kobe (pannello b) riportando le due componenti dello slip velocity, l'evoluzione della trazione in funzione dell'ampiezza di slip totale e l'andamento del rake nel tempo.



**Figura 3.23:** da sinistra a destra andamento della velocità di dislocazione componente strike; andamento della velocità di dislocazione componente dip; trazione in funzione dello slip per le due componenti insieme; andamento del rake nel tempo; andamento della velocità di rottura nel tempo. Nel pannello a) caso di Fukuoka. Nel pannello b) caso di Kobe

L'ultima figura di entrambi i pannelli mostra l'andamento del rake nel tempo poiché negli assi sono rappresentati lo spostamento lungo strike e lungo dip. Le frecce rappresentano la direzione della trazione nei vari istanti di tempo, e le crocette rappresentano il valore di slip (sia la componente strike che dip). Nel caso di Fukuoka (a sinistra) la componente con un maggiore slip è quella lungo strike.. Nel caso di Kobe l'andamento della trazione, come descritto dall'andamento temporale del rake (quasi di  $45^\circ$ ) è descritto da entrambe le componenti con un peso simile.



### 3.3 Calcolo dell'energia di frattura

Come descritto nel capitolo 1, l'evento sismico può essere interpretato come un episodio di fratturazione di una superficie (o delle sue asperità in contatto), che, a partire dall'ipocentro, si propaga sul piano di faglia con un fronte di rottura producendo una dislocazione. Tale processo può pertanto essere descritto attraverso un bilancio energetico.

La creazione della frattura richiede un aumento dell'energia interna necessaria all'accrescimento della superficie. Tale energia è prodotta dal lavoro delle forze esterne che al passaggio del fronte di rottura accrescono l'energia di deformazione del materiale contro le forze dissipative che si oppongono alla creazione della frattura.

Sul piano di faglia, al passaggio del fronte di rottura, l'energia potenziale accumulata viene in parte liberata sotto forma di onde elastiche che si propagano fin sulla superficie terrestre, in parte viene spesa in lavoro meccanico sulla faglia, ovvero nella realizzazione della superficie di frattura, nella produzione di calore, nella formazione del gouge, e in due altri processi dissipativi. Questa energia spesa sulla faglia è legata al rilascio di sforzo, e pertanto interpretata nei modelli classici (Ida, 1972) come l'area sottesa dalla curva di weakening, come illustrato in figura 2.4, dove la parte sopra il livello di attrito dinamico è quella che determina la creazione della frattura e ne controlla la propagazione (*'fracture energy'*).

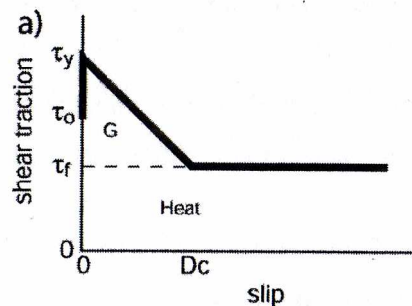


Figura 24: Modello classico dell'andamento della trazione (Ida, 1972; Andrews, 1976). L'area indicata con la lettera G rappresenta l'energia di frattura.

Tuttavia nei terremoti reali l'energia così definita non può essere separata in modo semplice dagli altri contenuti dissipativi, poiché l'andamento della trazione in generale si discosta da quello teorizzato da Ida (1972) e Andrews (1976).

Per questo motivo Tinti et al. 2005 scelgono di introdurre una nuova grandezza, il '*breakdown work (W<sub>b</sub>)*', definito come il lavoro prodotto nel processo di dislocazione dal valore iniziale della trazione a quello minimo.

$$W_b = \int_0^{T_b} (\bar{\tau}(t) - \bar{\tau}_{\min}) \cdot \vec{u}(t) dt \quad (3.1)$$

dove,  $\tau(t)$  è la trazione di taglio,  $\bar{\tau}_{\min}$  è il valore minimo assunto dalla tensione,  $\vec{u}(t)$  è la velocità di dislocazione,  $T_b$  è il tempo di breakdown.  $W_b$  è una densità di energia (J/m<sup>2</sup>).

Il breakdown work definisce il lavoro fatto sulla sottofaglia durante la caduta di sforzo, lavoro che può comprendere sia l'energia di superficie, che il lavoro fatto contro le forze dissipative, e rispetto alla valutazione dell'energia nell'interpretazione dovuta ai modelli classici, tiene conto anche di un'eventuale evoluzione della trazione in funzione dello slip più complessa in cui non è possibile definire un valore di attrito dinamico costante (come gli andamenti osservati nei paragrafi precedenti).

Poiché la trazione nella fase terminale non sempre rimane ad un valore costante ma oscilla intorno a tale valore o sale ad un valore più alto, è possibile anche calcolare il '*restrengthening work (W<sub>r</sub>)*' definito come il lavoro prodotto a partire dal valore minimo della trazione fino alla fine della successione temporale.

$$W_R = \int_{T_b}^T (\bar{\tau}(t) - \bar{\tau}_{\min}) \cdot \vec{u}(t) dt \quad (3.2)$$

Quest'ultimo contributo tiene conto del lavoro fatto in seguito alla dislocazione per riportare il sistema ad una nuova condizione di equilibrio.

In figura 2.5, si mostra la partizione dell'energia come descritto da Tinti et al. (2005). In particolare viene ipotizzata una possibile e variabile separazione tra il contributo dell'energia di superficie e il calore diversa dai modelli classici.

L'introduzione di queste due densità di energia permette anche di calcolare l'*'excess work'* ( $W_e$ ), ovvero la somma tra il lavoro di breakdown e quello di restrengthening.

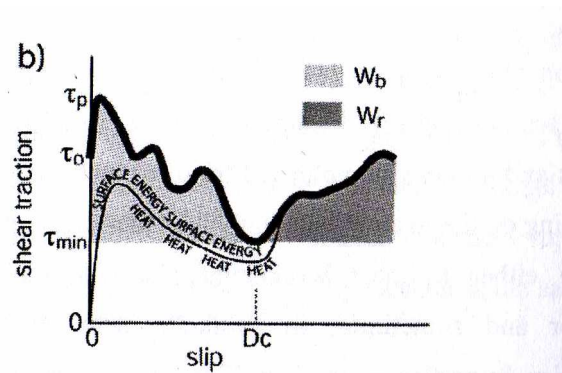
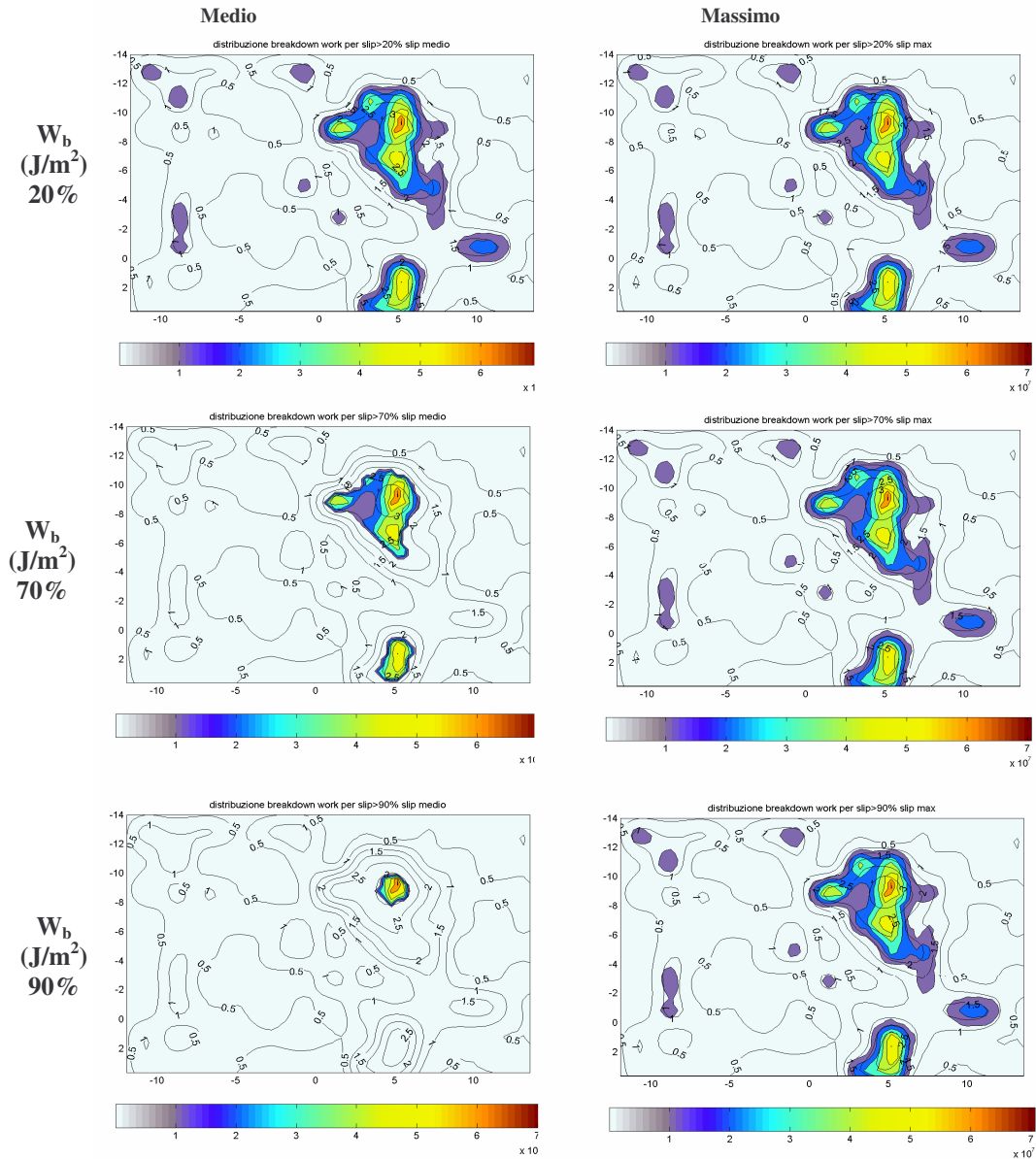


Figura 25: Interpretazione del bilancio energetico di Tinti et al. 2005.

### 3.3.1 Il calcolo delle distribuzioni sul piano di faglia

In questo paragrafo presentiamo i risultati ottenuti dal calcolo delle densità di breakdown work per i diversi terremoti studiati. Le tabelle che riassumono i risultati ottenuti e i grafici delle distribuzioni di breakdown work di tutti gli eventi considerati sono riportati in Appendice B.



**Figura 3.26:** In figura sono riportate diverse distribuzioni del breakdown work ( $\text{J/m}^2$ ) per l'evento di Fukuoka (2005). Rispettivamente, dall'alto verso il basso, è riportato il contributo delle sottofaglie che hanno slip maggiore del 20% dello slip medio (massimo), del 70% dello slip medio(massimo), del 90% dello slip medio(massimo). Il contorno in nero rappresenta lo slip.

In figura 3.26 riportiamo la distribuzione della densità di breakdown work. La zona della faglia che contribuisce maggiormente alla creazione della frattura conferma il dato stabilito in precedenza, ovvero si tratta della parte della faglia che ha dislocato con slip maggiore del 90% dello slip medio. Un altro dato interessante deriva dalla

distribuzione della densità di energia per quella parte della faglia che disloca del 90% dello slip massimo.

Essa rappresenta il contributo dovuto alle asperità, ovvero quelle zone che producono la dislocazione maggiore. Nel caso di Fukuoka tale densità mostra che, per la maggior parte delle sottofaglie, il rilascio di energia è legato all'abrasione delle asperità.

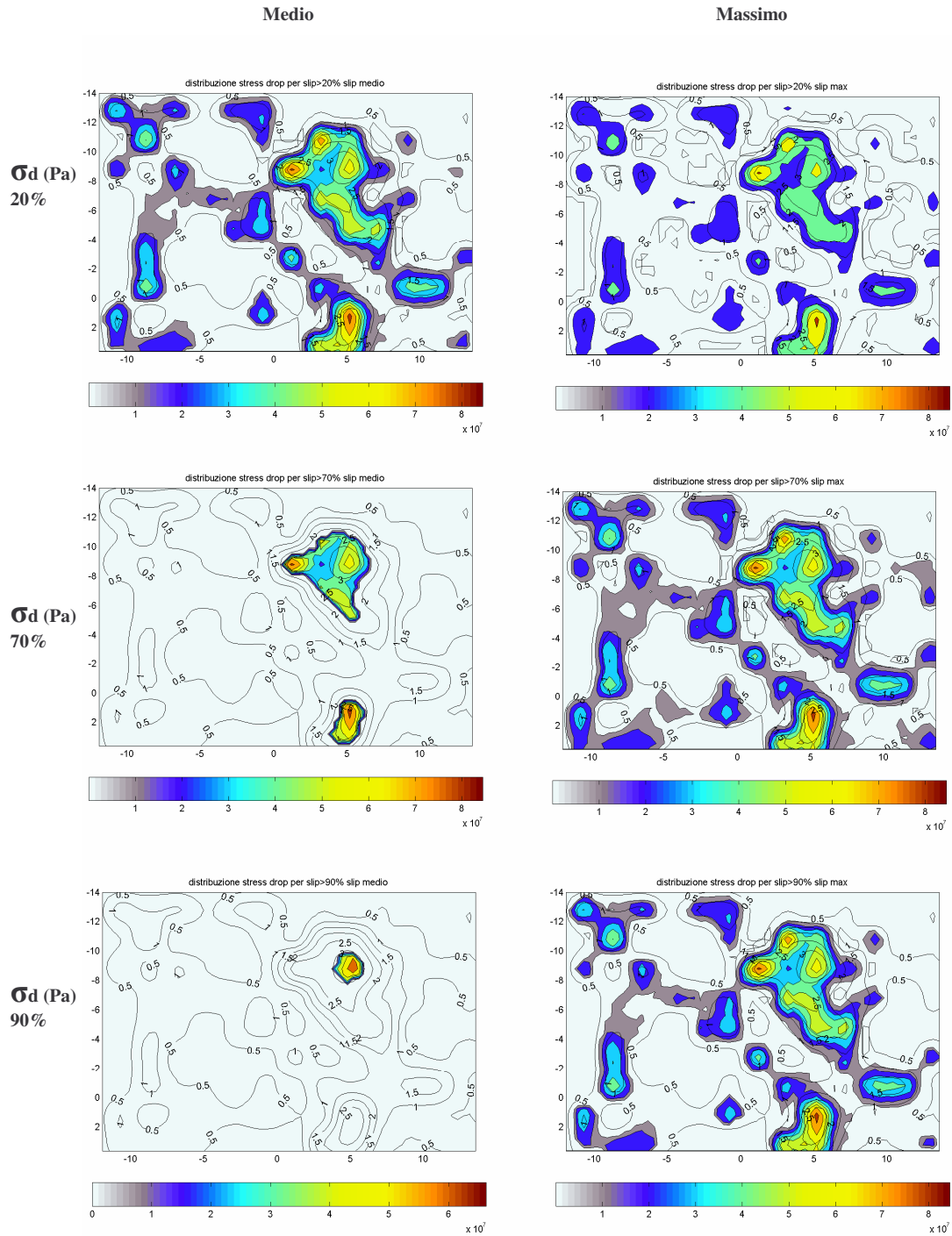
Lo stress drop e lo strength excess sono due dei i parametri che caratterizzano le trazioni valutate come soluzione diretta dell'equazione dell'elastodinamica e descritte nel paragrafo 3.2.

Qui di seguito descriveremo tali distribuzioni in rapporto allo slip, valutando il contributo apportato dalle sottofaglie che dislocano rispettivamente del 20% , del 70% e del 90% dello slip medio. In figura 3.27 è riportata la distribuzione della stress drop sulla faglia e mostra come il rilascio di stress controlli la dislocazione: le sottofaglie che dislocano del 90% rispetto allo slip medio corrispondono alle zone di rilascio maggiore.

In figura 3.28 è riportata la distribuzione dello strength excess sulla faglia. Lo strength excess è distribuito grossomodo intorno alle zone che hanno dislocato poiché esse agiscono come carico sulle sottofaglie circostanti e la trazione si accumula dove incontra una forte resistenza, ovvero in quelle zone che non hanno subito dislocazione.

Le sottofaglie che hanno prodotto una dislocazione maggiore del 70% dello slip medio mostrano una fase di herdening all'interno della zona di slip massimo. La distribuzione per valori di slip maggiori del 90% rappresenta un contributo molto piccolo allo strength excess. Queste considerazioni confermano che l'energia rilasciata dal terremoto è quasi interamente spesa nella fase di weakening, e che, nella la fase di hardening la trazione viene ridistribuita prevalentemente nelle zone esterne alla dislocazione.

Per una visione completa dell'andamento delle trazioni in tutti gli eventi considerati si rimanda all'Appendice B. nel prossimo ed ultimo capitolo saranno sintetizzati e discussi i risultati qui presentati.



**Figura 3.27:** In figura sono riportate le distribuzioni dello stress drop (Pa) , in relazione allo slip (m). Rispettivamente, dall'alto verso il basso, è riportato il contributo delle sottofaglie che hanno slip maggiore del 20% dello slip medio, del 70% dello slip medio, del 90% dello slip medio. Il contorno in nero rappresenta lo slip. Caso di Fukuoka.

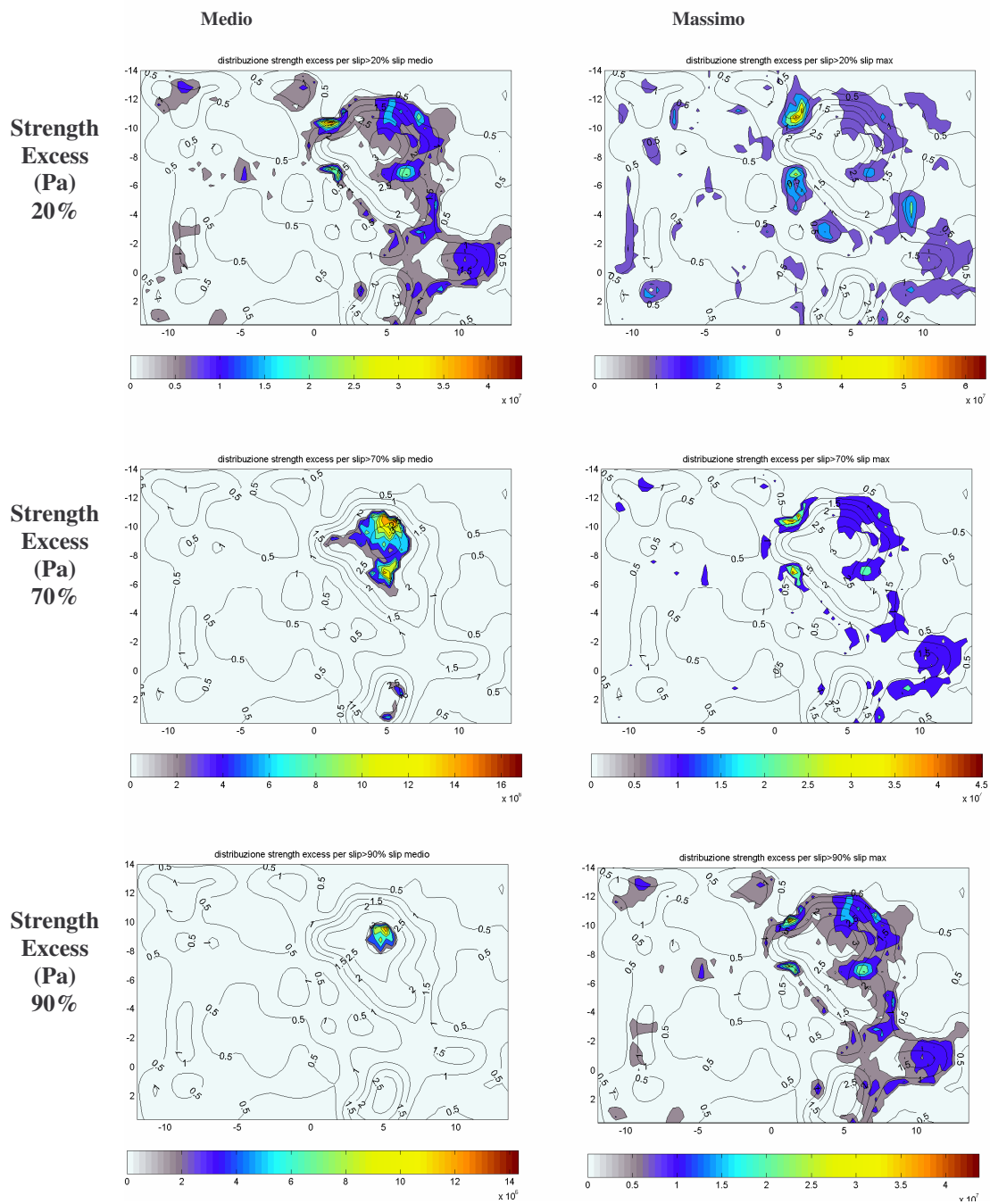


Figura 3.28: In figura sono riportate le distribuzioni dello strength excess (Pa) , in relazione allo slip (m). Rispettivamente, dall'alto verso il basso, è riportato il contributo delle sottofaglie che hanno slip maggiore del 20% dello slip massimo, del 70% dello slip massimo, del 90% dello slip massimo. Il contorno in nero rappresenta lo slip. Caso di Fukuoka.

## Capitolo 4

### Considerazioni conclusive

In questo lavoro ci si è posti l'obiettivo di valutare l'evoluzione della trazione sul piano di faglia allo scopo di vincolare l'energia di frattura durante un terremoto (che in accordo con Tinti et al., 2005, viene denominata *breakdown work*), di comprendere il processo associato alla caduta di sforzo durante la propagazione della rottura e di stimare i principali parametri dinamici. L'evoluzione della trazione è ricostruita in funzione del tempo e della dislocazione per una sorgente estesa, ciò permette quindi di calcolare i parametri dinamici sia come valori medi relativi all'intera faglia sia per particolari sottofaglie del piano e di studiare la dinamica alla base del processo sismogenetico.

Lo studio di una sorgente estesa permette di interpretare le evidenze delle eterogeneità del processo di rottura cosismica ottenute dai modelli cinematici (vincolati dai dati geofisici – geodetici e/o sismologici) e di estenderle ai modelli dinamici. Lo sviluppo di un modello in grado di tenere conto dell'eterogeneità e della distribuzione dei parametri dinamici permette di comprendere più adeguatamente i processi sismogenetici e di rilascio dell'energia durante forti terremoti.

In questo capitolo vengono discussi ed evidenziati i principali risultati emersi da questo studio, in particolare si analizza l'effetto della struttura crostale attraverso la realizzazione di un modello che tenga conto della stratificazione 1D e si determinano le leggi di scala che legano i principali parametri dinamici stimati.



#### 4.1 Effetto del modello crostale

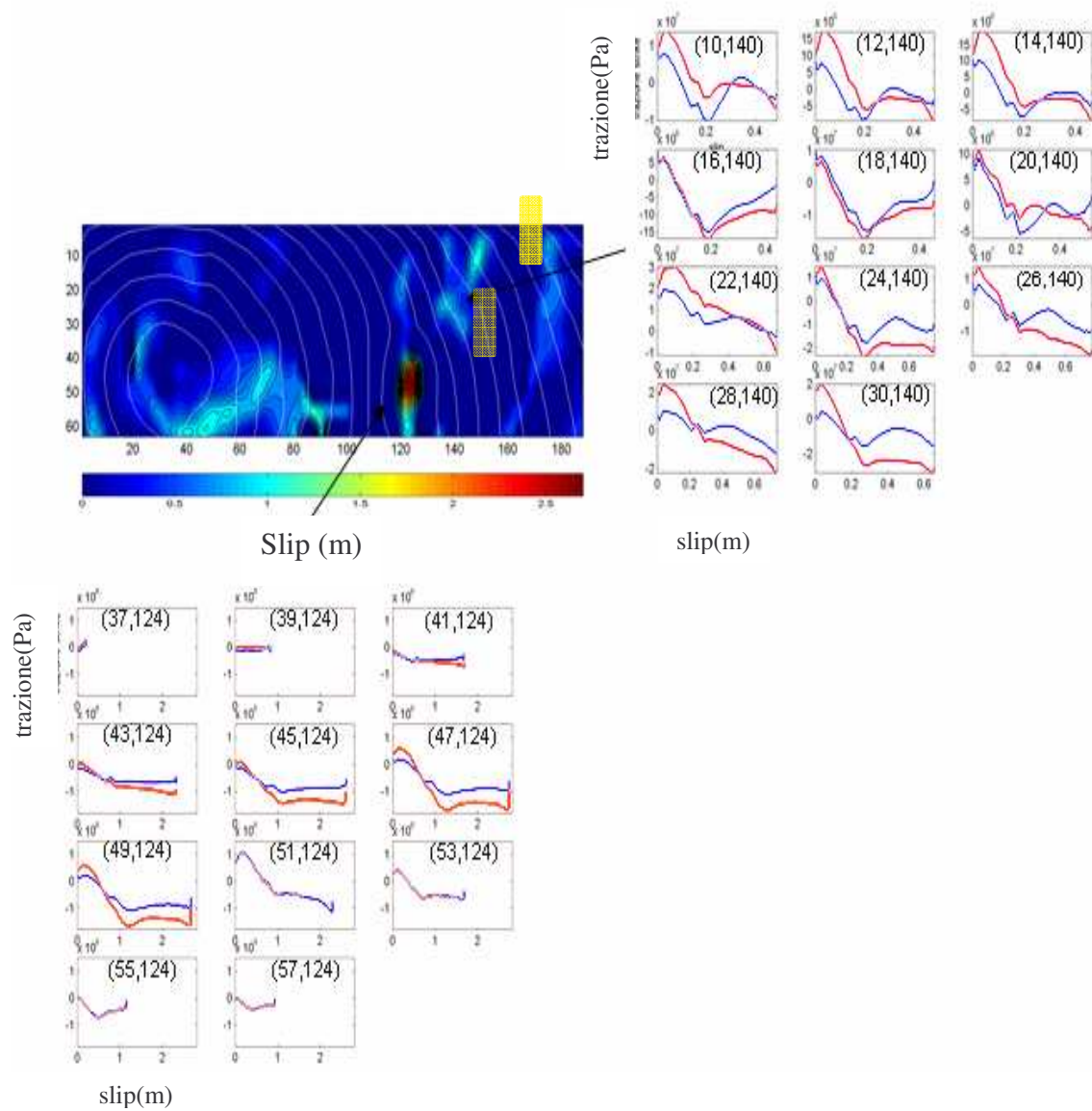
Nel presente studio si è proposto un modello dinamico che tenga conto della stratificazione 1D della struttura crostale in cui la rottura si propaga e si è applicato al caso di Morgan Hill. La scelta di questo particolare terremoto non è stata casuale, poiché per Morgan Hill è stata utilizzata una STF che si è dimostrata particolarmente adeguata alla descrizione della fase di *dynamic weakening*. Si tratta di una funzione di Kostrov troncata (figura 3.20 nel capitolo 3), sulla quale è stata effettuata un'operazione di smoothing con una box car di running mean pari a 0.07s. La funzione presenta una fase di accelerazione particolarmente rapida quindi, subito dopo il picco di velocità, presenta un cambiamento di pendenza che descrive la fase in cui avviene la maggior parte della dislocazione e successivamente la fase di arresto, descritta da una rapida decelerazione a zero. Quindi il modello cinematico disponibile per il terremoto di Morgan Hill permette di avere una buona risoluzione della fase di weakening e di studiare l'effetto del modello crostale sull'evoluzione della trazione dinamica.

In figura 4.1 riportiamo l'andamento delle trazioni per alcune sottofaglie scelte in modo da descrivere l'effetto della stratificazione introdotta. In tabella 4.1 sono evidenziati in grigio i valori di riferimento per il modello omogeneo.

I grafici illustrano da sinistra a destra l'andamento in profondità nelle due zone considerate. È evidente la dipendenza della trazione dalla stratificazione 1D rispetto al modello omogeneo, gli andamenti coincidono dove le caratteristiche del modello sono le stesse.

Al contrario nelle altre sottofaglie la forma cambia poiché le caratteristiche del modello crostale determinano il tipo di carico che si esercita sulle sottofaglie circostanti e quindi la fase di rilascio di sforzo come descritto dall'equazione di Fukuyama e Madariaga, 1998 (in questa tesi eq. 2.3).

Poiché i modelli cinematici tengono conto della stratificazione, questa valutazione permette di determinare come la scelta del modello influisca sulla descrizione dinamica del processo.



**Figura 4.1:** Confronto tra modello con struttura (blu) e modello omogeneo (rosso). I plot illustrano da sinistra a destra l'andamento in profondità nelle due zone evidenziate in giallo. Su ogni plot viene indicata la sottofaglia (y,x) in cui è calcolato l'andamento. Il punto y=10 è ad una profondità pari a 1.6 km, quindi le sottofaglie successive sono ad una profondità di +0.64km. La sottofaglia nel punto y=57 si trova ad una profondità pari a 9.12 km dove le strutture coincidono.

VELOCITY-DENSITY STUCTURE			
DEPTH	P-VEL	S-VEL	DENS
[km]	[km/s]	[km/s]	[g/cm <sup>3</sup> ]
0.00	3.38	1.95	2.60
1.10	4.79	2.76	2.70
9.10	6.00	3.46	2.70
13.50	6.80	3.92	2.80
16.60	7.11	4.10	2.90
26.00	8.00	4.62	3.20
230.00	8.20	4.73	3.20

**Tabella 4.1: Modello di velocità e densità**

In tabella 4.2 riportiamo le stime dei parametri dinamici e dell'energia relativamente al caso di un modello omogeneo (a sinistra) e al caso di un modello con struttura (a destra) valutati per alcune delle sottofaglie in figura 4.1. I risultati mostrano che la stima varia soprattutto sulla valutazione dello strenght excess e questo comportamento può essere spiegato in base al fatto che le caratteristiche del mezzo in cui la dislocazione si propaga determinano la capacità del mezzo di resistere allo sforzo applicato e di conseguenza spiegano il valore della trazione di soglia. Nel caso in esame la variazione dello strength excess si riflette sulla stima del breakdown work sebbene la media di tale valore sull'area di faglia non risulti significativamente diversa nei due modelli. Quest'ultima valutazione trova ragione nel fatto che l'effetto della stratificazione è quello di alterare localmente l'andamento della trazione rispetto al modello omogeneo fornendo alle volte una stima più alta dei parametri dinamici ad esempio nella sottofaglia (18,140), e in altri casi più bassa, ad esempio nella sottofaglia (10,140). Si vuole inoltre sottolineare il fatto che l'effetto del carico dovuto alle faglie adiacenti si propaga sulla faglia per interazione a primi vicini con l'effetto di una perturbazione del campo di sforzo. Tale effetto condiziona fortemente l'evoluzione della trazione in particolare condiziona la differenza tra gli andamenti riportati in figura 4.1. Questa analisi dimostra chiaramente la dipendenza dei parametri dinamici dalla struttura crostale e mette in evidenza la necessità di introdurre la descrizione della

stratificazione in profondità in un modello atto a descrivere dinamicamente il processo sismogenetico.

	OMOGENEO			STRUTTURA		
	Stress drop (Pa)	Strength excess (Pa)	Wb (J/m <sup>2</sup> )	Stress Drop (Pa)	Stength sxcess	Wb
(12, 140)	9.26e+6	1.69e+7	2.31e+6	9.11e+6	7.78e+6	7.40e+5
(30, 140)	3.07e+7	2.01e+7	4.73e+6	1.55e+7	4.09e+6	2.47e+6
(47, 124)	1.70e+8	6.04e+7	8.75e+7	1.11e+8	2.04e+7	4.09e+7
(51, 124)	1.14e+8	1.0e+8	1.02e+8	1.14e+8	1.06e+8	1.04e+8
	Stress medio		Wb medio	Stress medio		Wb medio
	9.11e+6		1.89e+6	8.02e+6		1.25e+6

Tabella 4.2: I principali parametri relativi al caso di Morgan Hill

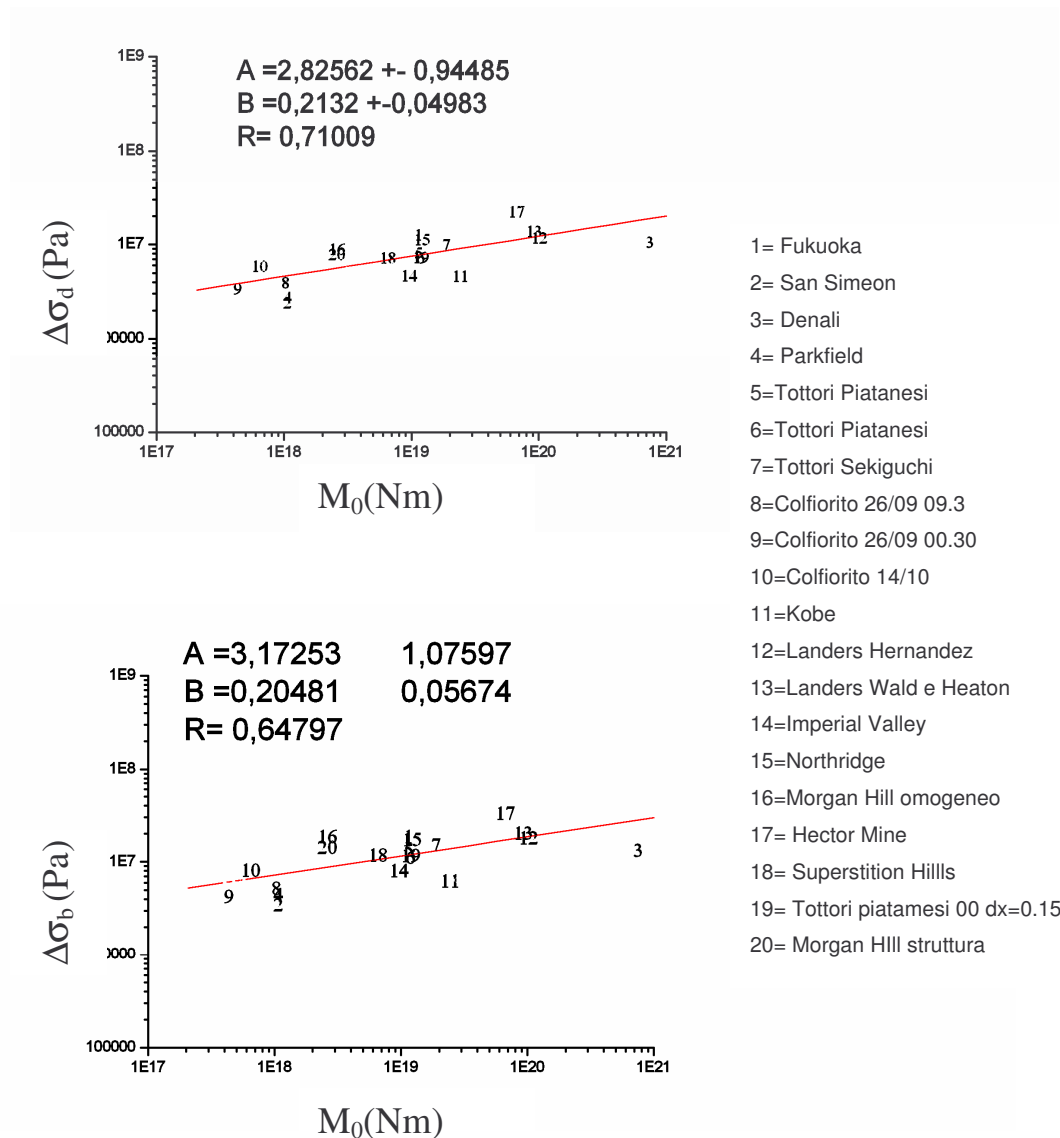
## 4.2 Le leggi di scala

In questo paragrafo vengono presentate le leggi di scala tra i principali parametri dinamici stimati in questo lavoro. Il set di dati è costituito da 15 terremoti reali descritti nel capitolo 3 per alcuni dei quali sono stati considerati differenti modelli. Il campione risulta pertanto costituito da 20 elementi.

### 4.2.1 Lo stress drop

In figura 4.2 è riportato l'andamento dello stress drop dinamico (in alto) e quello del breakdown stress drop (in basso), in funzione del momento sismico. Tali andamenti riguardano i valori mediati su tutta la faglia.

La regressione sulla distribuzione dello stress drop dinamico relativo ai 20 casi elencati nella legenda a destra della figura, produce un buon fattore di correlazione  $R=0.64797$  e stabilisce per i due parametri una legge di scala del tipo:  $\Delta\sigma_d = AM_0^B$ . La scala è scelta di tipo log - log per rendere più evidente lo scaling dei dati.



**Figura 4.2:** In alto, stress drop dinamico  $\Delta\sigma_d$  in relazione al Momento sismico; in basso,  $\Delta\sigma_b$  breakdown stress drop in relazione al momento sismico. Andamento lineare del tipo  $y=A+Bx$ . R è il coefficiente di correlazione.

La dispersione dei punti rispetto alla retta può essere attribuita sia al fatto che questi sono valori medi rispetto a faglie di dimensioni molto diverse tra loro sia alla scarsa risoluzione disponibile per quanto riguarda i parametri dinamici come il  $\Delta\sigma_d$  o il  $D_c$  prodotta dall'inversione delle forme d'onda e messa in evidenza da Guatterri e Spudich (2000). Nella figura successiva (figura 4.3) è riportato l'andamento dello stress drop mediato sulle sottofaglie che hanno dislocato

rispettivamente del 20 %, del 70 %, del 90 % dello slip massimo. Questo tipo di analisi viene effettuata allo scopo di verificare la variazione della legge di scala quando si consideri il contributo dovuto alle asperità. La regressione delle tre rette rappresentate in figura produce un coefficiente di correlazione R e un valore della pendenza B della retta di regressione simile in tutti i casi a quello descritto in figura 4.2.

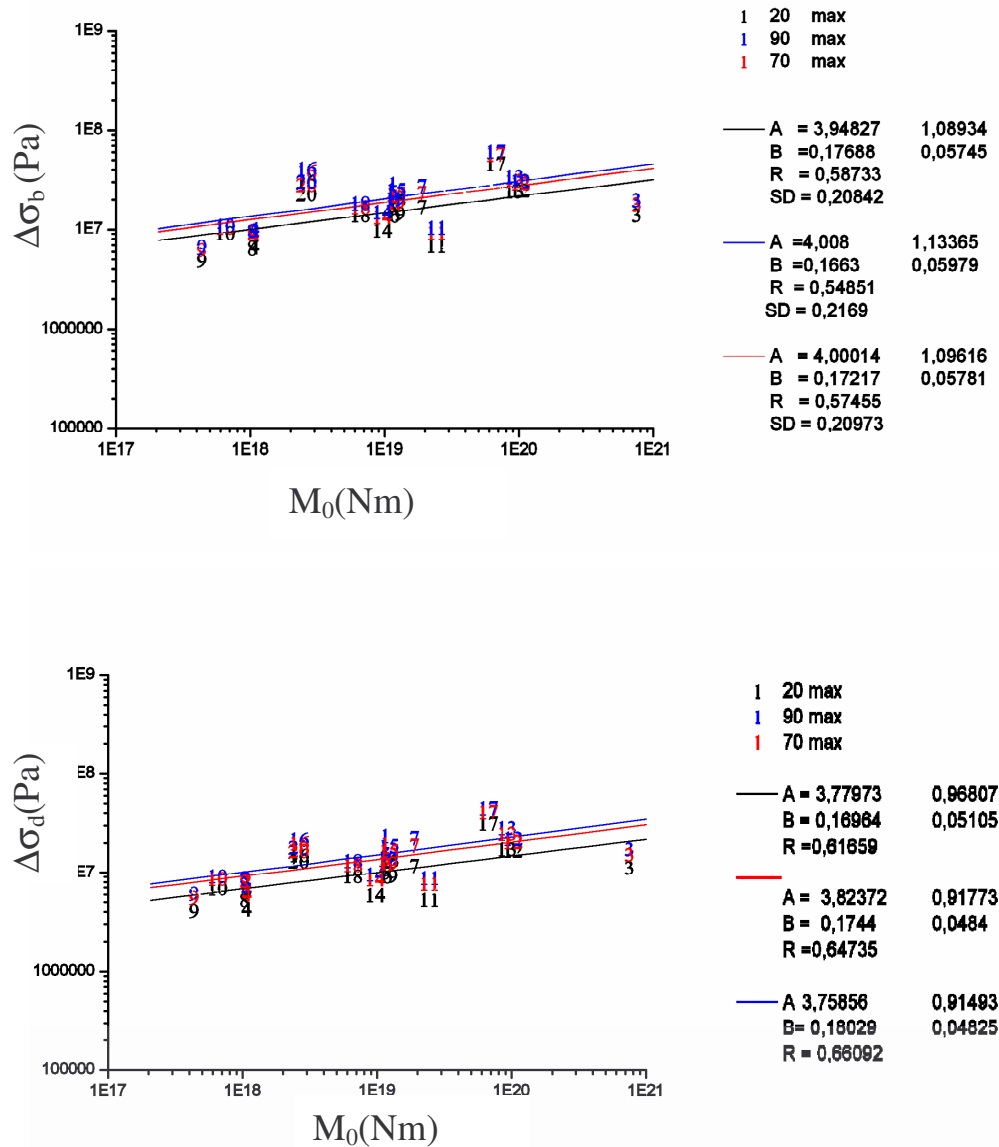


Figura 4.3: In alto  $\Delta\sigma_b$ , in basso  $\Delta\sigma_d$ , in relazione al Momento sismico, valore mediato sulle faglie che hanno dislocato rispettivamente del 20%, del 70%, del 90% rispetto allo slip massimo.

La legge di scala risulta pertanto indipendente dal contributo delle sottofaglie. Si può quindi concludere che l'andamento dello stress drop dinamico in funzione del momento sismico non dipende dall'area in cui viene calcolato.

Mai et al. (2006) dimostrano la dipendenza dello stress drop dalle dimensioni della faglia, pertanto si discute, di seguito, l'andamento risultante da una media pesata sull'area della faglia dello stress drop in relazione al momento sismico (figura 4.4). Il valore dell' $R^2$  della regressione non lineare mostra che in questo caso il fit è in accordo migliore con i dati e descrive un andamento del tipo:

$$\Delta\sigma_d \approx \frac{M_o^B}{A_i} A_{tot}$$

$A_i$  è l'area della  $i$ -ima faglia e  $A_{tot}$  è la somma delle aree di tutti

i terremoti considerati.

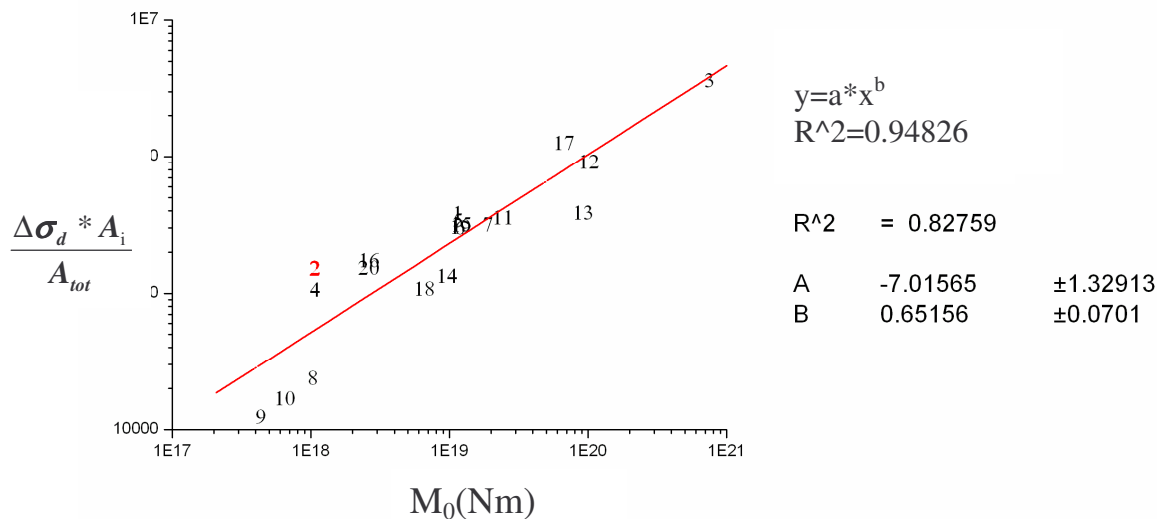


Figura 4.4:  $\Delta\sigma$  pesato sul valore dell'area in relazione al momento sismico

Con questa valutazione non si vuole introdurre una nuova legge di scala poiché non si è in possesso di un numero sufficiente di dati per descrivere l'andamento. Si vuole piuttosto mettere in luce il fatto che la dispersione dei punti rispetto all'andamento atteso è controllata dalla area della faglia e suggerisce che i terremoti molto forti si comportino diversamente da quelli piccoli poiché la dispersione (figura 4.3) cresce nel caso di terremoti forti.

Un altro dato interessante risulta dal rapporto tra lo stress drop dinamico e il breakdown stress drop. Rice et al. (2005) dimostrano che nel caso in cui l'andamento della trazione segua una legge di tipo slip weakening il rapporto  $\frac{L}{R}$ , in cui L è la dimensione della zona di dislocazione e R è la dimensione della zona di caduta dello sforzo nel piano di faglia, è funzione del rapporto  $\frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\sigma_b}$ . Questo rapporto è indipendentemente dalla velocità di rottura e può essere valutato in base alla conoscenza dei parametri stimati dall'andamento della trazione. La figura 4.5 mostra che il rapporto  $\frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\sigma_b}$  ha un bassissimo coefficiente di correlazione (R) con il momento sismico come prevedibile dal fatto che gli andamenti di  $\Delta\sigma_b$  e  $\Delta\sigma_d$  (figura 4.2) risultano molto simili. Si può quindi concludere che questo rapporto è indipendente dal momento sismico. Purtroppo valutazioni di tipo statistico sulla variazione di questo parametro non sono affidabili poiché il campione in esame è troppo piccolo per poter effettuare test di ipotesi. Inoltre, allo stato attuale, non sarebbe comunque possibile escludere un effetto di condizionamento di tale rapporto dalle ipotesi effettuate sul modello.

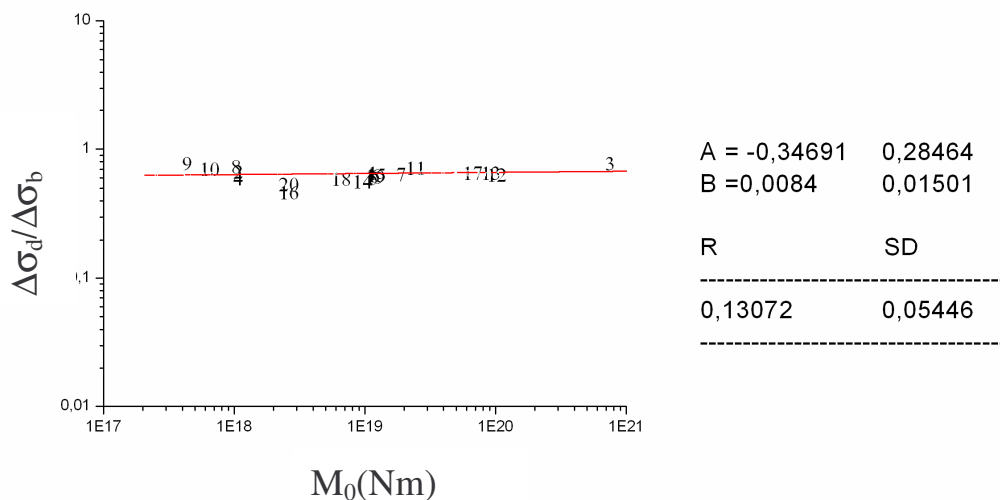


Figura 4.5: Rapporto  $\Delta\sigma_d/\Delta\sigma_b$  in funzione del momento sismico



### 4.2.2 Breakdown Work

L'ultima parte di questa tesi è dedicata alle stime di energia spesa nella zona di weakening. Nel capitolo 3 è stato introdotto il breakdown work definito nel lavoro di Tinti et al. (2005) allo scopo di rimuovere l'ambiguità di terminologia legata all'energia di frattura. Il breakdown work valuta l'energia spesa nella creazione della frattura ed in meccanismi dissipativi come la produzione del calore, o la formazione del gouge. Di seguito, in figura 4.6, riportiamo l'andamento dell'energia di breakdown, definita come il breakdown work moltiplicato per l'area della faglia in relazione al momento sismico.

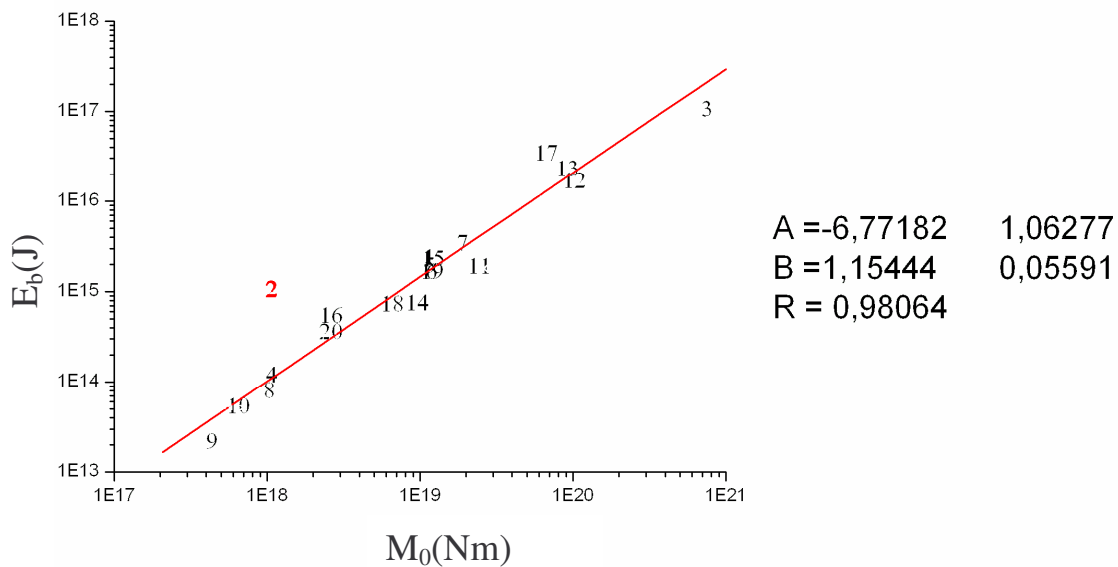
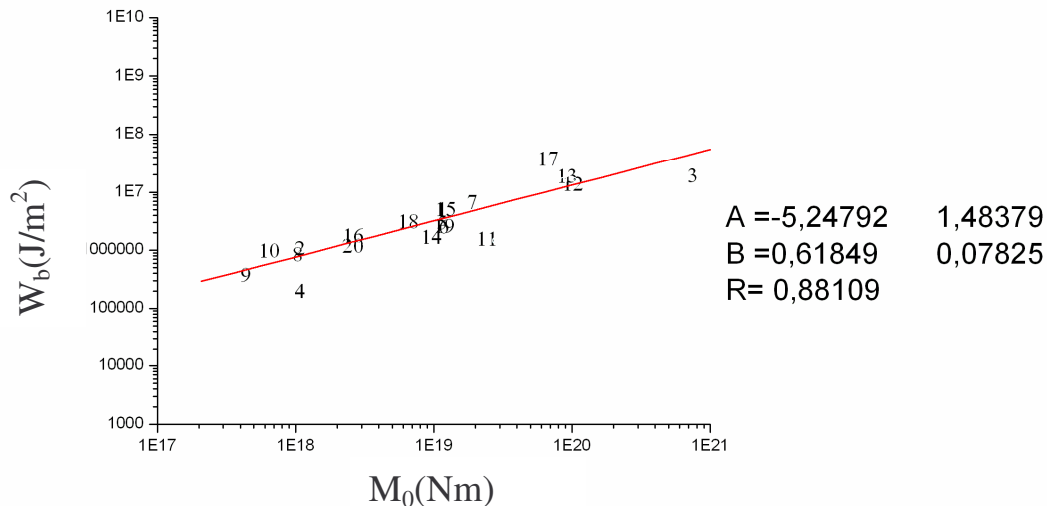


Figura 4.6: Energia in relazione al momento sismico

Nel calcolo della regressione lineare non è stato considerato il terremoto di San Simeon, poiché il modello in studio non è quello definitivo. L'andamento ottenuto, ampliando il set di dati studiato da Tinti et al. (2005) con terremoti reali di media e forte magnitudo, conferma la pendenza della retta : B=1.15 nel nostro

modello,  $B=1.18$  nel modello di Tinti et al.2005. La densità di breakdown work è riportata in figura 4.7. La pendenza della retta di regressione è pari a 0.62 e, anche in questo caso, l'andamento esteso ad un set più ampio di terremoti conferma il valore della pendenza della retta di regressione, 0.57, ottenuta da Tinti et al. (2005). Tale valore è in accordo con lo 0.55 ottenuto da Mai et al (2005).



**Figura 4.7: Densità di breakdown work in rapporto al momento sismico.**

In questo studio si estendono i risultati di Tinti et al. (2005) ai casi in cui la media viene effettuata sulle sottofaglie che presentano dislocazione pari al 20%, al 70% e al 90 % dello slip medio e dello slip massimo (figura 4.8). Tali andamenti producono nel caso delle faglie che dislocano lo stesso valore per la pendenza della retta di regressione entro l'intervallo definito dalla deviazione standard. Si è voluto tenere conto del contributo delle sottofaglie con una certa percentuale di slip rispetto ad un valore di riferimento perché nel primo caso, quando le percentuali di slip sono riferite alla dislocazione massima, si vuole valutare l'effetto delle asperità e nel secondo caso, quando le percentuali di slip sono riferite alla dislocazione media, si è voluta mostrare la dipendenza dell'energia al variare dei contributi dati da alcune zone della faglia.

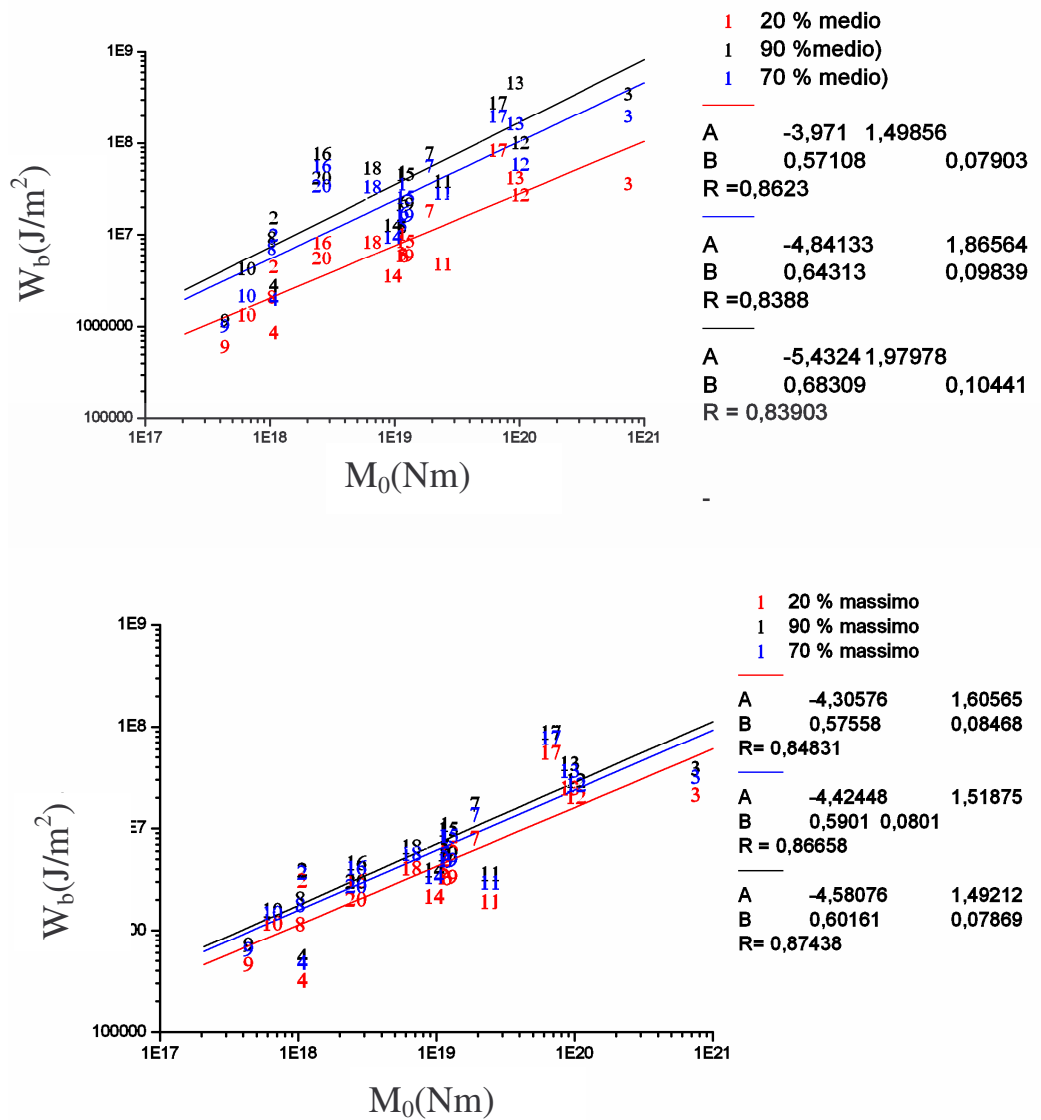
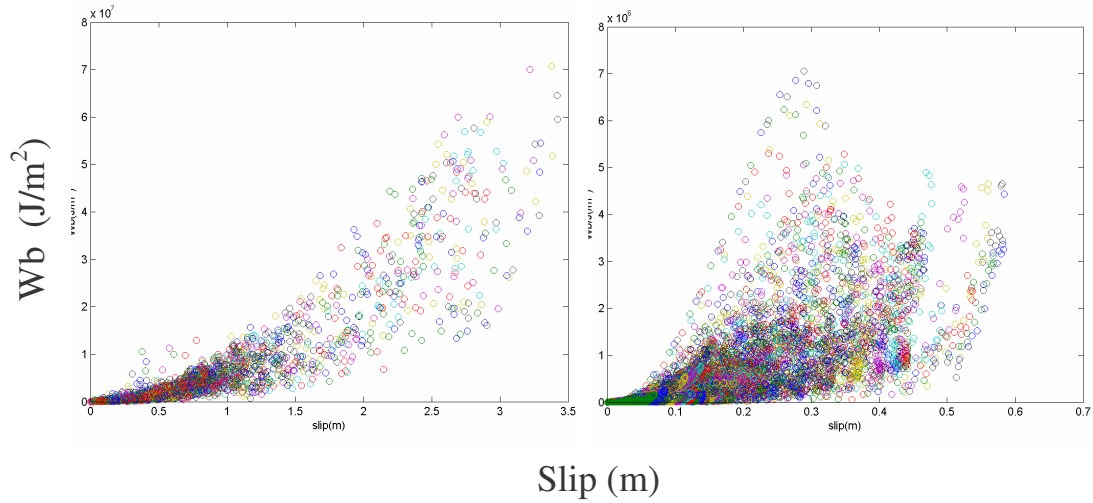


Figura 4.8: Breakdown work in funzione del momento sismico, valutato sulle sottofaglie che hanno dislocato del 20%, del 70%, del 90% dello slip medio (in alto) e dello slip massimo (in basso)

Quest'analisi permette di confermare quanto stabilito da Tinti et al. (2005) che l'energia di frattura è ben vincolata anche in zone della faglia molto piccole, come nel caso del contributo delle sottofaglie di slip pari al 20 % rispetto allo slip medio, e che la legge di scala è indipendente dal tipo di contributo scelto. Il

calcolo valutato sul contributo delle sottofaglie che hanno dislocato di una certa percentuale rispetto allo slip medio mostrano variabilità in un range di un ordine di grandezza più grande rispetto alle medie eseguite rispetto ad una percentuale rispetto al valore massimo di dislocazione, ovvero i contributi all'energia cambiano notevolmente rispetto alla percentuale considerata. Questo andamento conferma le osservazioni effettuate nel capitolo 3 sulle distribuzioni di breakdown work.

Un altro dato interessante nasce dall'analisi del breakdown work in rapporto allo slip sulla faglia; Di seguito riportiamo tali andamenti, locali, per il caso di Fukuoka e di Parkfield. Come già discusso in precedenza, questi due terremoti si distinguono per via della velocità di rottura, costante nel caso di Fukuoka, variabile nel caso di Parkfield. Dalle figure risulta che, nel caso di Fukuoka, l'andamento è ben descritto da una relazione del tipo  $W_b \propto \Delta u^2$  e conferma, su un nuovo set di dati, l'andamento ottenuto da Tinti et al. (2005) e descritto da Rice et al. (2005). Al contrario, il caso di Parkfield mostra una distribuzione più allargata e presenta una dispersione di punti molto evidente rispetto alla curva che definisce la legge di scala  $W_b \propto \Delta u^2$ . E' nota in letteratura la dipendenza dell'energia di frattura dalla velocità di rottura pertanto tale andamento può essere associato al fatto che il modello di Parkfield è descritto da una velocità di rottura variabile. Questo tipo di andamento è descritto dalla legge di scala definita da Rice et al. (2005).



**Figura 4.9: Breakdown work in relazione allo slip, distribuzione sulla faglia. A sinistra caso di Fukuoka (velocità di rottura costante), a destra caso di Parkfield (velocità di rottura variabile)**

In ultima analisi si vuole valutare il rapporto tra il breakdown work e il breakdown stress drop in relazione allo slip sulla faglia. In figura 4.10 a) viene riportato l'andamento locale in rapporto alla dislocazione (ogni punto rappresenta il dato relativo ad una sottofaglia), per il caso di Fukuoka. In 4.10 b) è riportato l'andamento in rapporto allo slip medio. Entrambe le figure mostrano una legge di scala di tipo lineare, la dispersione dei punti nel caso della figura b) è attribuita all'errore. Il modello di Rice et al. (2005) prevede una legge di tipo lineare con pendenza circa pari a 1 per il rapporto  $\frac{W_b}{\Delta\sigma_b}$  in relazione allo slip.

La figura 4.10 b) non conferma tale previsione per il set di terremoti studiati.

Si può ipotizzare che la differenza dei valori di B per i due andamenti sia dovuta al fatto che i modelli teorici trattano il singolo punto e lo estendono alla faglia intera trattandola come omogenea. L'andamento locale mostra infatti una pendenza molto simile a quella stimata in questo lavoro, come descritto in figura 4.10 a), e tale comportamento può essere attribuito alle eterogeneità della faglia.

Le evidenze dell'eterogeneità della distribuzione dei parametri dinamici sul piano di faglia ottenute in questo studio pongono seri dubbi sulla possibilità di eseguire valutazioni in un singolo punto della superficie

considerandole rappresentative dell'intera superficie. Questo è comunemente fatto nei modelli teorici, che assumono un tipo di evoluzione della trazione, stabiliscono delle relazioni teoriche tra i parametri dinamici e le estendono all'intero piano di faglia.

La complessità del processo di rottura non permette un simile approccio. Una soluzione potrebbe essere quella di dimostrare che le leggi di scala sono self-similari, ma questo richiede ulteriori ricerche.

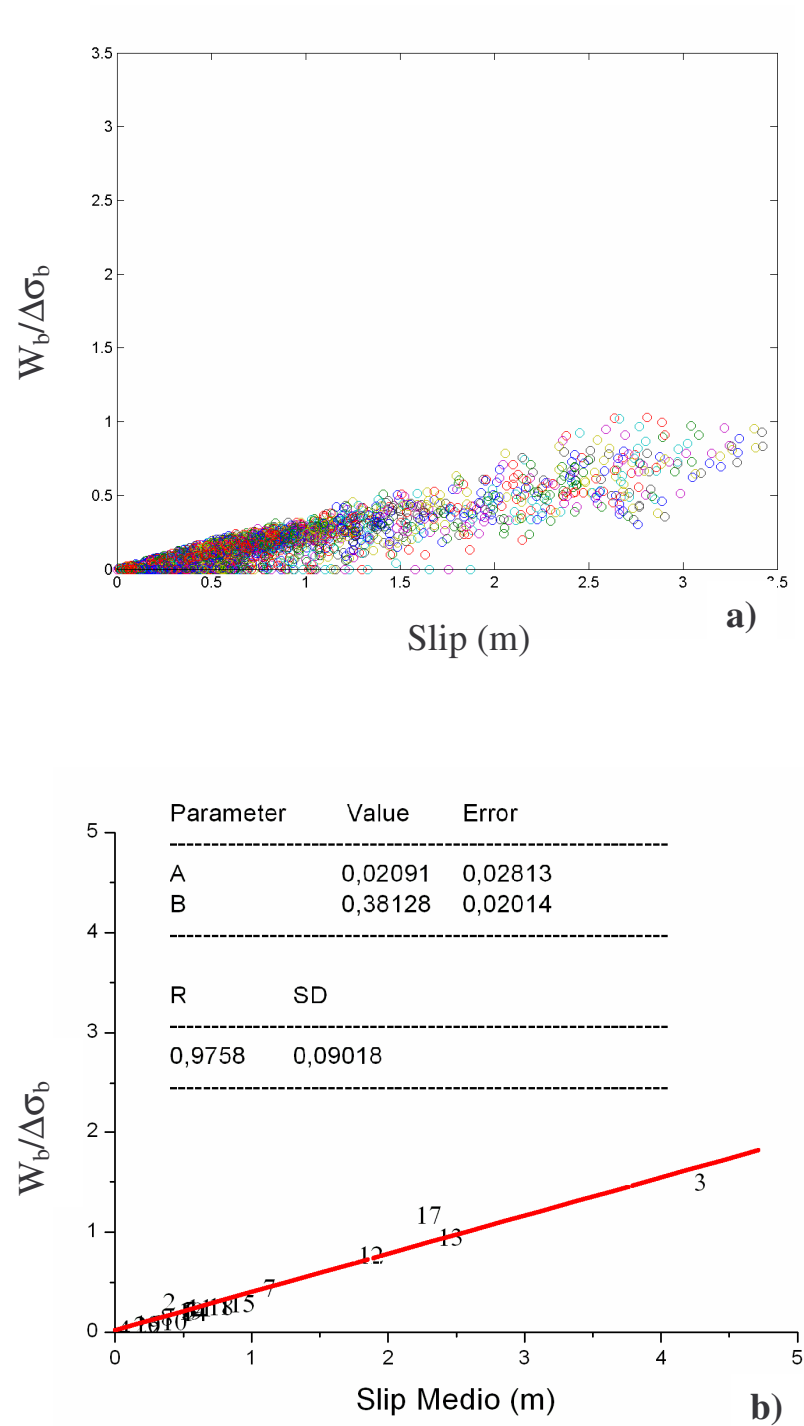


Figura 4.10: figura a), rapporto  $\frac{W_b}{\Delta\sigma_b}$  in relazione allo slip, distribuzione sulla faglia.( caso diFukuoka) figura b), rapporto  $\frac{W_b}{\Delta\sigma_b}$  in relazione allo slip medio.

### **4.3 Conclusioni**

In questo lavoro è stato implementato un metodo innovativo per vincolare l'evoluzione della trazione in funzione del tempo e della posizione sul piano di faglia ed è stato applicato a diversi terremoti recenti per i quali sono disponibili modelli cinematici che descrivono la propagazione della rottura cosismica. In particolare, il metodo di cui ci si è avvalsi è basato sulla soluzione dell'equazione dell'elastodinamica ed utilizza come dati di ingresso per determinare l'evoluzione della trazione dinamica la distribuzione di slip finale sul piano di faglia e la sua evoluzione nel tempo. Il vantaggio di questa procedura numerica è che non richiede l'impiego di una legge costitutiva imposta a priori.

Nonostante i risultati ottenuti mediante questa procedura dipendano dalla risoluzione spaziale disponibile nei modelli principali, è stato verificato che le stime di breakdown work e breakdown stress drop sono attendibili. Un risultato molto importante ottenuto in questo lavoro è che gli andamenti locali (in ciascuna sottofaglia) della trazione sia in funzione del tempo sia in funzione della dislocazione mostrano un chiaro comportamento tipo 'dynamic fault weakening', ovvero l'andamento atteso in base all'interpretazione teorica del processo di nucleazione e propagazione della rottura cosismica. In altre parole è riprodotto il processo responsabile del rilascio di energia e dell'emissione della radiazione sismica.

Questo lavoro fornisce inoltre un contributo originale rispetto a quello pubblicato da Tinti et al. (2005) in quanto allarga il data set di terremoti considerati (15 eventi sismici per 20 modelli dinamici ottenuti), propone le distribuzioni sul piano di faglia per lo stress drop dinamico e per il breakdown stress drop e discute diverse leggi di scala tra i parametri dinamici fondamentali. Un ulteriore risultato originale è quello dello studio dell'effetto del modello crostale sulla trazione dinamica totale. È stato infatti studiato il terremoto di Morgan Hill e si è dimostrato che la struttura crostale modifica l'evoluzione della trazione in funzione della dislocazione e cambia leggermente i valori del breakdown work. Tuttavia, le variazioni ottenute non sembrano modificare le leggi di scala ottenute.



A partire dalla conoscenza dell'andamento della trazione in funzione della dislocazione cosismica è stato inoltre possibile effettuare una stima dei principali parametri dinamici che caratterizzano il processo. Si sono analizzate le distribuzioni del rilascio di sforzo e dello *strength excess* sulla faglia allo scopo di verificare la relazione che intercorre tra le zone che producono la dislocazione ed i parametri che caratterizzano l'evoluzione della trazione. Tale distribuzione risulta eterogenea come era lecito attendersi dal fatto che le eterogeneità guidano il processo di accumulo e rilascio dello sforzo. Allo scopo di valutare il contributo di alcune zone significative della faglia si è scelto di discriminare le sottofaglie in base alla percentuale di slip rispetto al valor medio e massimo della dislocazione e si è potuto verificare che le sottofaglie che presentano maggiore dislocazione (>90%) corrispondono anche alle zone di rilascio di stress maggiore, mentre lo *strength excess* tende a distribuirsi intorno alle zone dove si è prodotta la dislocazione poiché valuta la differenza tra valore iniziale e valore di soglia della trazione e pertanto rappresenta una fase di accumulo della trazione.

Analisi dello stesso tipo sono state effettuate per la valutazione della distribuzione del breakdown work. In questo caso, dall'analisi del contributo dovuto alle sottofaglie che hanno dislocato più del 90% rispetto alla dislocazione media o massima risulta che per la maggior parte delle sottofaglie il rilascio di energia è legato all'abrasione delle asperità. Tali valutazioni permettono anche di confermare quanto descritto da Tinti et al (2005) in merito al fatto che il valore massimo del breakdown work si produce in zone geometricamente complesse.

Da questo studio risulta pertanto evidente come le eterogeneità che caratterizzano una sorgente estesa siano necessarie a descrivere la fase di propagazione e di arresto della dislocazione; esse sono associate alle eterogeneità della crosta terrestre che determinano il passaggio da un regime detto di weakening, instabile, ad un regime detto di strengthening stabile (Boatwright e Cocco, 1996).

Un parametro molto importante ottenuto dagli andamenti della trazione dinamica è il breakdown work. Infatti, come definito da Tinti et al. (2005) questo parametro corrisponde all'energia di frattura nei modelli classici e fornisce quindi una stima dell'energia spesa per far propagare il fronte di rottura. I valori ottenuti per i

diversi terremoti sono in accordo con quelli pubblicati recentemente in letteratura (Rice et al., 2005; Tinti et al., 2005) e dimostrano che il breakdown work non può essere trascurato nella stima del bilancio energetico di un terremoto in quanto costituisce un contributo confrontabile all'energia irradiata.

In ultima analisi sono state proposte diverse leggi di scala per i parametri dinamici stimati. Poniamo qui particolare attenzione all'andamento del breakdown work e dell'energia totale di breakdown in funzione del momento sismico poiché l'andamento mostra che l'energia totale e la densità di energia crescono con il momento sismico seguendo una legge di potenza. I risultati di questo lavoro sono importanti in quanto il data set investigato contiene forti terremoti come Hector Mine ed in particolare Denali, permettendo di estendere la legge di scala ad elevati valori del momento sismico. L'andamento del breakdown work in funzione dello slip conferma i risultati ottenuti da Tinti et al. (2005) e dimostra come la velocità di rottura possa influenzare la legge di scala ottenuta.

Infine, è stato dimostrato che il rapporto tra stress drop dinamico e breakdown stress drop non dipende dal momento sismico. L'interpretazione di questo risultato richiede ulteriori ricerche. Una prima analisi, che aveva motivato la verifica di tale legge di scala, suggerisce che questo parametro possa fornire una stima del rapporto tra dimensione della zona di breakdown e dimensione della zona coesiva (Rice et al., 2005). Tuttavia, non è chiaro al momento la ragione per cui questo rapporto sia molto simile tra tutti i terremoti studiati in questo lavoro. Infatti, l'andamento dello stress drop dinamico pesato per l'area della superficie di faglia di ciascun evento sismico suggerisce che i terremoti molto forti si comportino diversamente da quelli piccoli. Una interpretazione definitiva di questi risultati richiede tuttavia ulteriori ricerche. È importante sottolineare come i risultati ottenuti in questo lavoro pongano nuove domande e stimolino ulteriori studi per comprendere la meccanica dei terremoti ed i meccanismi responsabili del rilascio di energia.

# Appendice A

## Differenze finite

Il metodo consiste nel discretizzare il dominio di integrazione con una griglia regolare di nodi, e sostituire le derivate dell'equazione differenziale con opportuni rapporti incrementali valutati su tale griglia. Attraverso la discretizzazione l'equazione differenziale si traduce in un sistema di equazioni differenziali per ogni punto (nodo) della griglia. Le condizioni iniziali risultano assegnate sul primo e sull'ultimo nodo.

Il sistema può essere riscritto introducendo la notazione vettoriale, ad esempio  $y = Ax$ .  $A$  è una matrice tridiagonale, definita positiva, pertanto il sistema è risolvibile. Poiché le equazioni differenziali costituiscono la relazione che lega la soluzione del sistema alle sue derivate parziali, è possibile trovare un'approssimazione numerica della soluzione sulla griglia di integrazione. Se si assegna il valore della funzione incognita su un opportuno insieme del dominio di integrazione (incognite scalari) è possibile costruire, tramite sviluppo in Taylor a partire dal sistema discretizzato, un sistema approssimante nelle incognite scalari. L'equazione risultante è un'equazione esplicita risolvibile numericamente.

Il metodo alle differenze finite presenta due problemi, legati alla stabilità e alla convergenza del metodo:

il sistema approssimante genera una soluzione numerica *stabile* se la differenza tra il valore reale e quello approssimante non diverge all'aumentare del numero dei nodi della discretizzazione, ed è legata all'amplificazione degli errori di arrotondamento, ovvero l'arrotondamento introdotto dalla lunghezza finita della griglia.

Il sistema approssimante genera una soluzione *consistente* nel limite per gli incrementi finiti delle variabili indipendenti che tendono a zero, esso restituisce l'espressione differenziale di partenza.

Un sistema che sia stabile e consistente si dice *convergente*.

Il metodo alle differenze finite permette di risolvere l'equazione dell'elastodinamica (Andrews, 1973) in modo da determinare la velocità di rottura  $\Delta \dot{u}$  attraverso l'assegnazione di una legge costitutiva sul piano di faglia, oppure determinare la  $\tau(t)$  attraverso l'assegnazione della velocità di rottura  $\Delta \dot{u}$  come condizione al contorno (Andrews, 1999). Il metodo che presentiamo in questo lavoro si avvale della seconda strada, poiché l'obiettivo proposto è quello di determinare l'evoluzione della trazione sul piano di faglia senza imporre una legge costitutiva a priori. (Tinti et al., 2005)

Nel capitolo 1 si è descritto il comportamento della rottura a vari stadi di sviluppo, dalla fase di nucleazione alla fase di arresto.

Si è visto come la creazione di un fronte di rottura generasse una zona di discontinuità tra i punti appartenenti alla superficie di rottura e i punti esterni ad essa.

Il fronte di rottura veniva interpretato come una zona di deformazione anelastica, e in quei punti la discontinuità veniva tradotta in una discontinuità sulla dislocazione e sulla velocità di propagazione della rottura.

Si è indicata tale dislocazione in termini spaziali con

$$\Delta u_i = [u_i|_{\Sigma^+} - u_i|_{\Sigma^-}] \quad (5.1)$$

dove  $\Delta u_i$  rappresenta il vettore di slip attraverso la faglia.

Questa discontinuità è associata ad una variazione della tensione, pertanto, il valore della tensione può essere determinato direttamente dalla soluzione dell'elastodinamica con tale vincolo imposto a priori, vincolo che prende il nome di '*boundary condition*'.

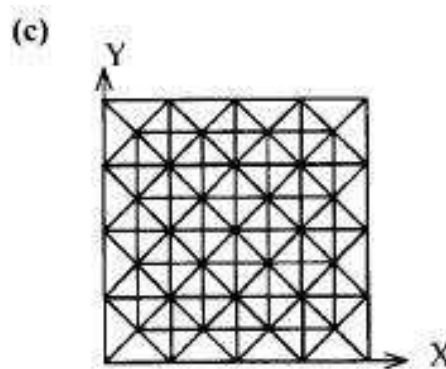
Si risolve il sistema di equazioni discretizzate:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{u}_1 &= \frac{\partial}{\partial x_1} \Sigma_{11} + \frac{\partial}{\partial x_2} \Sigma_{12} \\ \rho \frac{\partial}{\partial t} \dot{u}_2 &= \frac{\partial}{\partial x_1} \Sigma_{12} + \frac{\partial}{\partial x_2} \Sigma_{22}\end{aligned}\tag{5.2}$$

In cui la condizione iniziale è data dal campo di stress presente prima e dopo la rottura.

Nella (5.2)  $\dot{u}$  è la derivata temporale dello slip e  $\Sigma_{ij}$  sono le componenti del tensore degli sforzi.

La griglia è costituita da triangoli equilateri (Figura 2.2) , ogni nodo si trova su un vertice del triangolo e questo tipo di discretizzazione, rispetto ai quadrilateri, garantisce una migliore efficienza di calcolo (Petshek & Hanson,1968; Trulio, 1964).



**Figura 2.1:** Grigliato per il metodo alle differenze finite di Andrews

Le componenti della velocità di slip sono scalate sia temporalmente che spazialmente rispetto alle componenti della trazione. Questi ultimi sono infatti definiti al centro del triangolo e in un intervallo temporale intero  $t_n = n\Delta t$  , mentre le componenti della velocità sono definite sui nodi, ai vertici del triangolo equilatero, e in intervalli temporali intermedi:  $t_{n-1/2} = (n-1/2)\Delta t$  . In questo modo

le (5.2) possono essere risolte su tutto il piano andando a calcolare la variazione delle componenti da un o step al successivo, ovvero definendo:

$$\begin{aligned} f_1 &= \left\{ \int \Sigma_{11} dx_2 - \int \Sigma_{12} dx_1 \right\} / A \\ f_2 &= \left\{ \int \Sigma_{21} dx_2 - \int \Sigma_{22} dx_1 \right\} / A \end{aligned} \quad (5.3)$$

Dove A è l'area dell'esagono formato dai centri dei triangoli equilateri primi vicini e l'integrale è calcolato sul suo contorno. Allora le (5.2) diventano:

$$\begin{aligned} \dot{u}_1^{n+1/2} &= \dot{u}_1^{n+1/2} + f_1^n \Delta t / \rho \\ \dot{u}_2^{n+1/2} &= \dot{u}_2^{n+1/2} + f_2^n \Delta t / \rho \end{aligned} \quad (5.4)$$

E la velocità calcolata all'istante  $t=n+1/2$  rappresenta la variazione dello spostamento dall'istante  $t=n$  all'istante  $t=n+1$ .

Se si assume che tutti i nodi della griglia di integrazione del piano di faglia siano soggetti alle leggi dell'elastodinamica, a esclusione di quelli sulla linea di frattura, essi sono vincolati l'uno all'altro dalla legge costitutiva, e forzati a muoversi a causa della sollecitazione prodotta dalle forze agenti su ogni nodo. La scansione temporale (discreta) è ottenuta ricalcolando su ogni nodo le forze, che variano con la velocità di slip e a causa dell'interazione reciproca dei nodi adiacenti. Imponendo la velocità di slip, come condizione al contorno, siamo pertanto in grado di determinare l'evoluzione temporale dello stress nella zona coesiva.

Un'altra possibilità, è legata all'assegnazione di una legge costitutiva che descriva il comportamento della trazione sulla superficie di discontinuità.

Mentre in questo secondo caso, la legge viene imposta a priori, nel primo caso questa legge è un risultato diretto dei calcoli.

La richiesta di stabilità e convergenza per il codice alle differenze finite, si traduce nell'ambito del problema dinamico, in tre condizioni sulla corretta

discretizzazione del piano di faglia, che rendano la soluzione approssimata fisicamente accettabile.

Tali condizioni sono:

1. la condizione di disaccoppiamento che deriva dalla necessità di ridefinire matematicamente la soluzione al vertice,  $\Delta x > \Delta t \cdot v_p$
2. la condizione di unicità che richiede che la resistenza all'attrito sia sempre maggiore di un limite inferiore negativo,  $\frac{dS}{du} > -\frac{1}{C}$ , dove  $C = \frac{\beta \Delta x}{\alpha \mu}$  (con la condizione  $\Delta x = \Delta t \cdot v_p$ ) è la '*local compliance*'.

Quest'ultima permette di riscrivere la condizione sulla pendenza delle rette come condizione sulla discretizzazione introducendo

$$-S'_m = \min \frac{dS}{du}, \text{ perché in questo caso diventa: } \Delta x < \frac{\alpha \mu}{\beta S'_m}.$$

3. Condizione sulla risoluzione della zona coesiva: affinché l'andamento della trazione nella zona coesiva sia ben risolto, l'intervallo di tempo che occorre alla faglia per dislocare dello slip caratteristico deve essere almeno descritto da 5 o 6 elementi di discretizzazione temporale. Tale condizione si traduce nella seguente:  $\Delta t \ll T_b$  dove  $T_b$  è il tempo della zona di breakdown.

Il problema della convergenza e della stabilità, nonché della risoluzione della zona coesiva è preso in esame nel lavoro di Cocco e Bizzarri, 2003.

# Appendice B

In questa sezione presentiamo i risultati ottenuti, e discussi nei precedenti capitoli. In testa al paragrafo, relativo al terremoto indicato, è riportata la distribuzione della dislocazione sviluppata con il metodo discusso nel capitolo 2; in ascissa e in ordinata viene indicata la coordinata della sottofaglia. Di seguito viene riportata una tabella in cui vengono indicate le sottofaglie in cui si è scelto di mostrare gli andamenti delle trazioni. Le sottofaglie sono state scelte in modo da descrivere gli andamenti in zone significative della faglia: nella sottofaglia in cui è massima la dislocazione (seconda colonna) e nelle due sottofaglie distanti 5 dy da questa (prima colonna e terza colonna rispettivamente); in una sottofaglia in cui la dislocazione è circa pari al valor medio; in una sottofaglia in cui, quando possibile, varia la velocità di rottura. Di seguito vengono mostrati gli andamenti della trazione quando siano considerate entrambe le componenti, lungo strike e lungo dip, e la variazione dell'angolo di rake nel tempo, come descritto nel capitolo 3. Quindi vengono riportate le distribuzioni del breakdown work per le sottofaglie che hanno dislocato del 20 %, del 70% e del 90 % rispetto alla dislocazione media e massima, dello stress drop e dello strength excess. Alla fine di ogni paragrafo viene riportata una tabella in cui vengono indicati i principali parametri dinamici stimati in questo studio.



## 1.1 Hector Mine

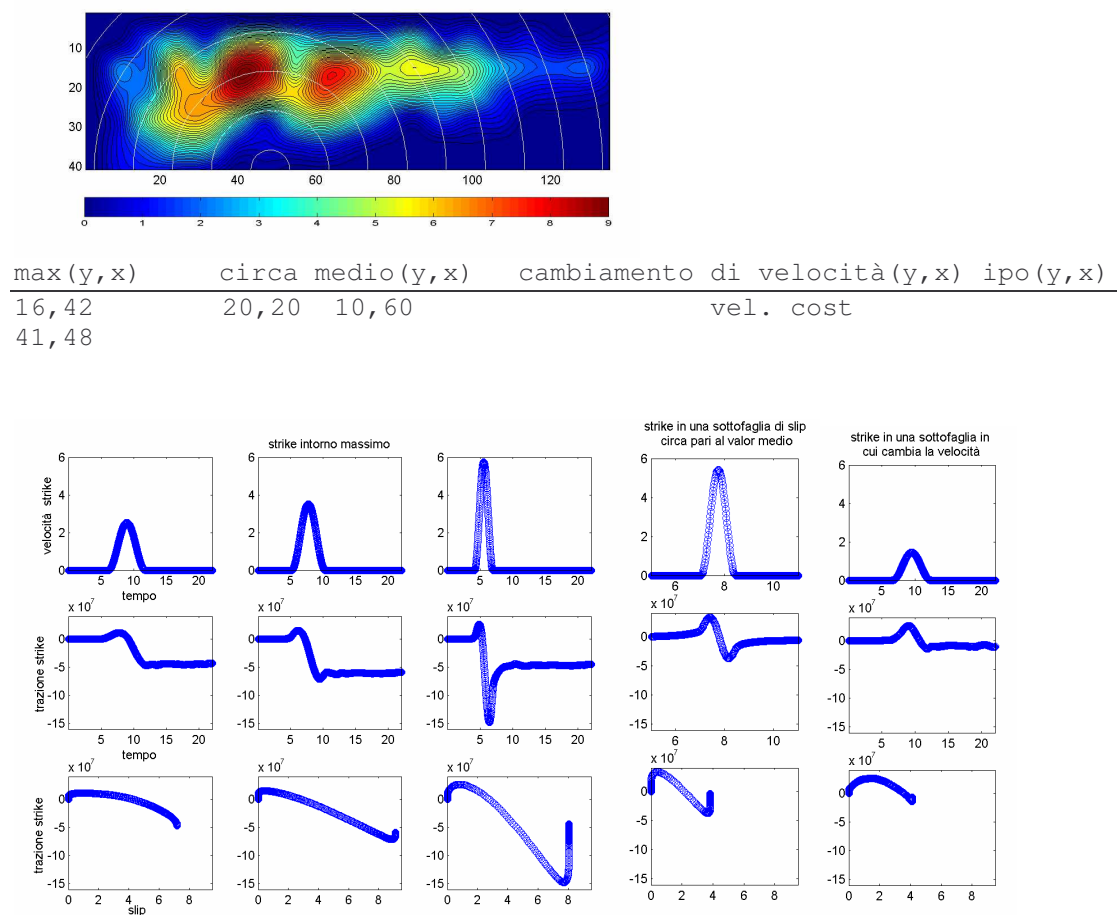


Figura 1: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

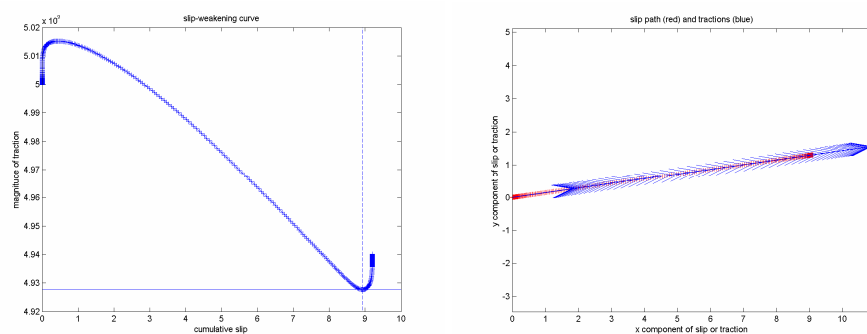
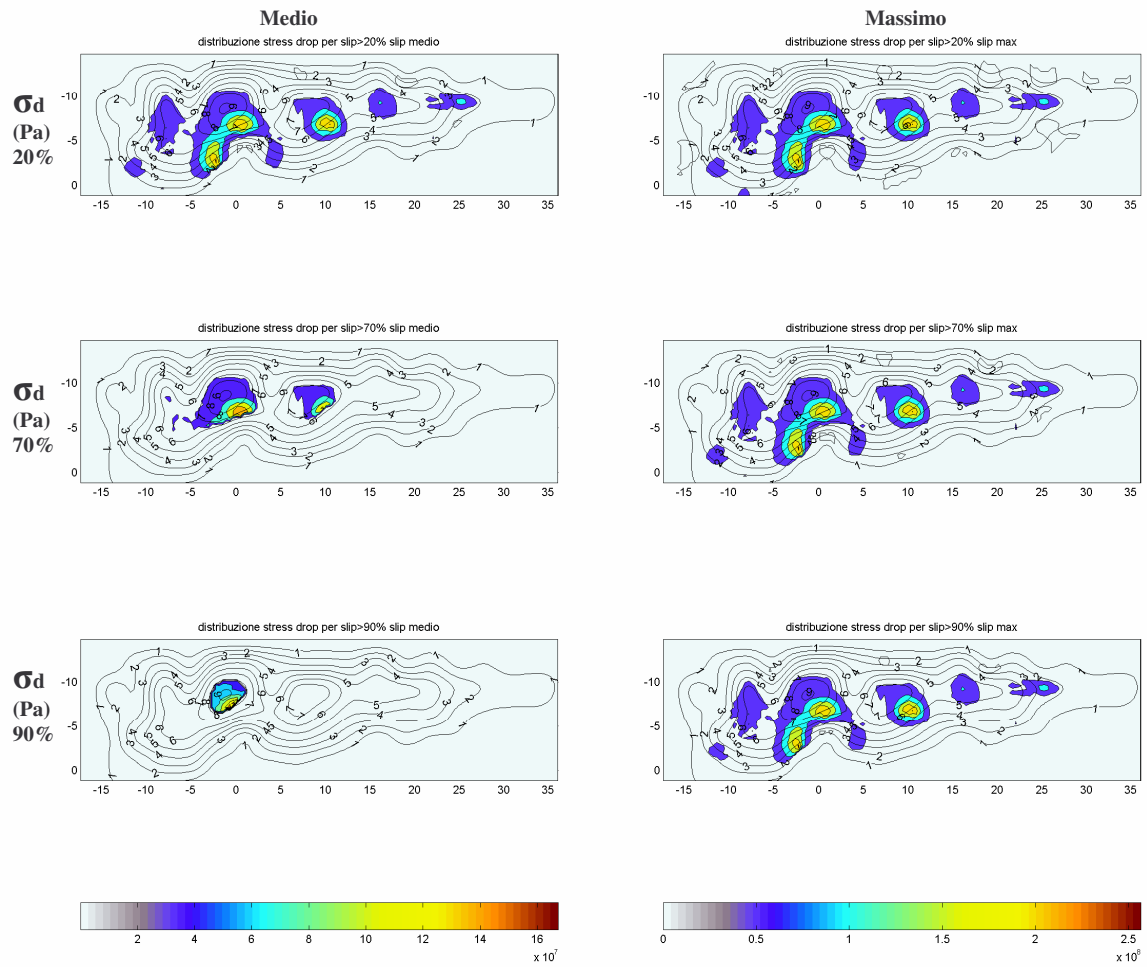
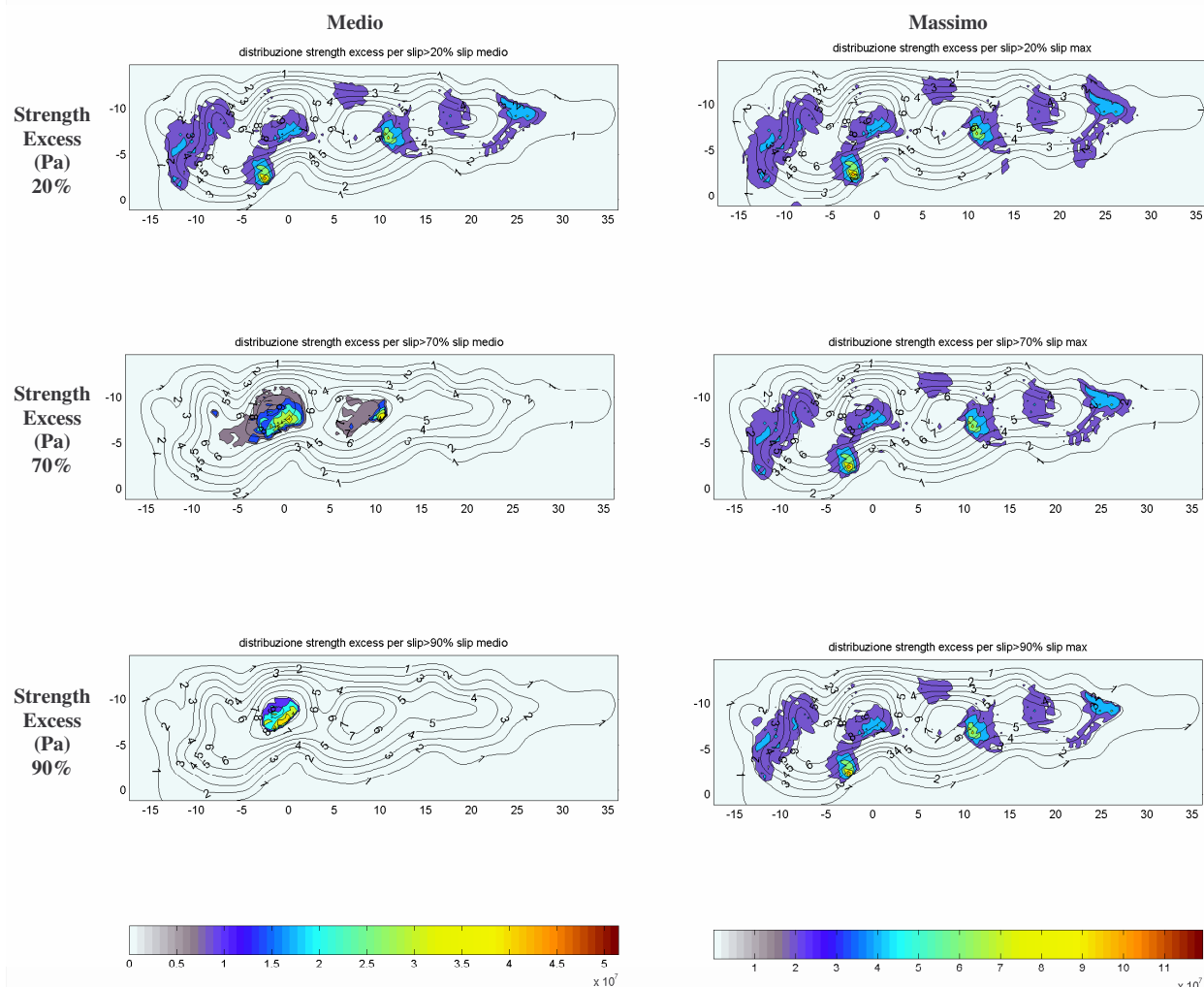


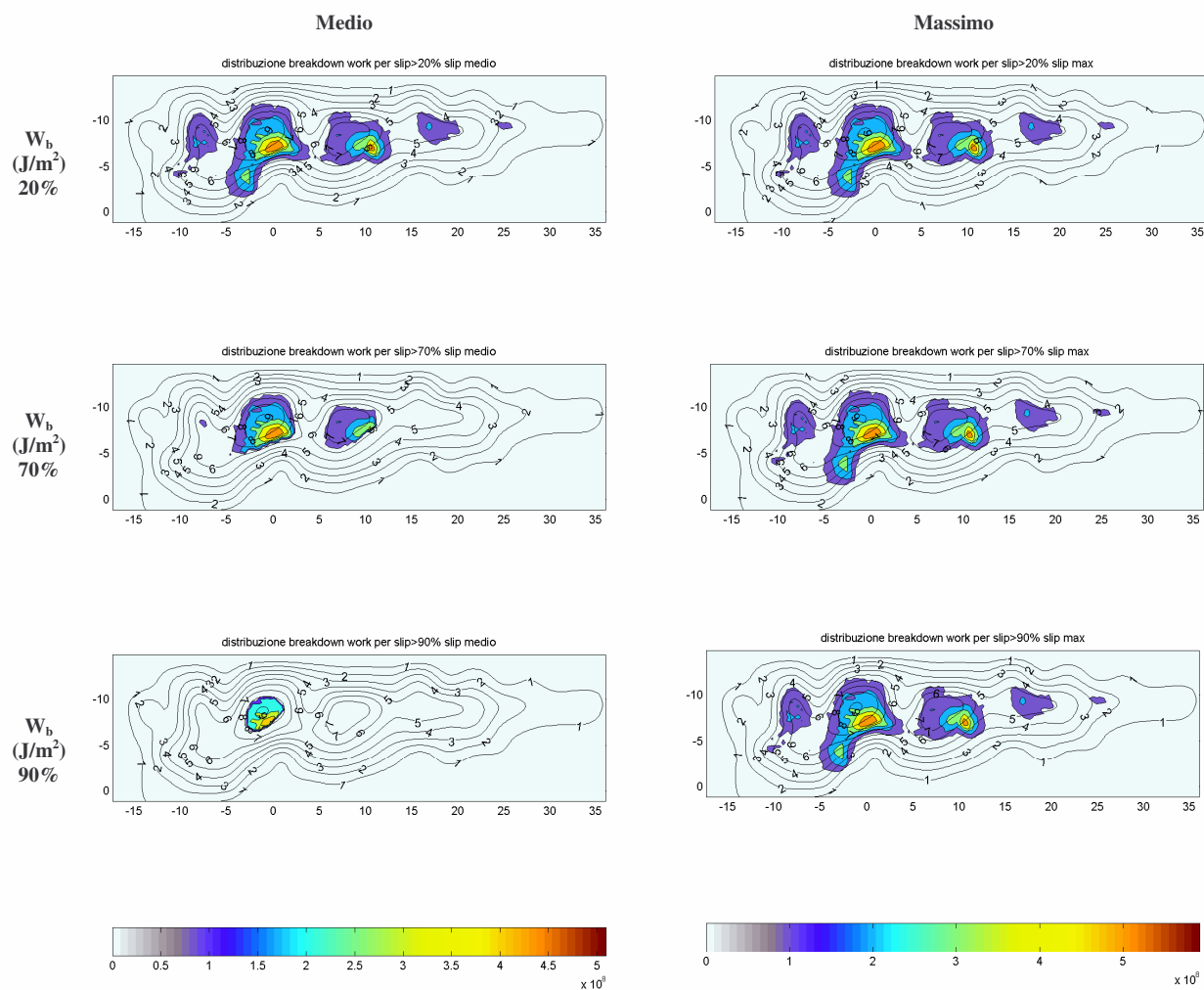
Figura 2: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.



**Figura 3: distribuzione dello stress drop dinamico(Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



**Figura 4: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottoglie di slip >20 % >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottoglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



**Figura 5: distribuzione di breakdown work( $\text{J/m}^2$ ): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**

Wb(J/m^2)	We(J/m^2)	Eb(J)	Ee(J)		
4.06e+007	4.09e+007	3.60e+016	3.62e+016		
stress(Pa/m^2)	strength(Pa/m^2)	breakstress(Pa)			
2.29e+007	1.13e+007	3.42e+007			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
5.76e+007	3.59e+016	9.13e+007	3.35e+016	8.10e+007	3.47e+016
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
5535	3897	2297	2680		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
8.61e+007	3.42e+016	2.88e+008	2.99e+015	2.05e+008	1.26e+016
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
5535	2484	65	383		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
3.24e+007	1.26e+011	4.60e+007	1.06e+011	4.24e+007	1.14e+011
>20(ave) Wsress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
4.43e+007	1.10e+011	7.88e+007	5.12e+009	7.38e+007	2.83e+010
>20(max) Wstrength	>20(max) strength	>90(max) Wstrength	>90(max) strength	>70(max) Wstrength	>70(max) strength
1.44e+007	5.63e+010	1.68e+007	3.86e+010	1.66e+007	4.44e+010
>20(ave) Wstrength	>20(ave) strength	>90(ave) Wstrength	>90(ave) strength	>70(ave) Wstrength	>70(ave) strength
1.68e+007	4.17e+010	2.58e+007	1.67e+009	1.80e+007	6.91e+009
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
9.1	2.3				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofaglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofaglie e a seguire il numero delle sottofaglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70 % e al 90 %. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

## 1.2 Denali

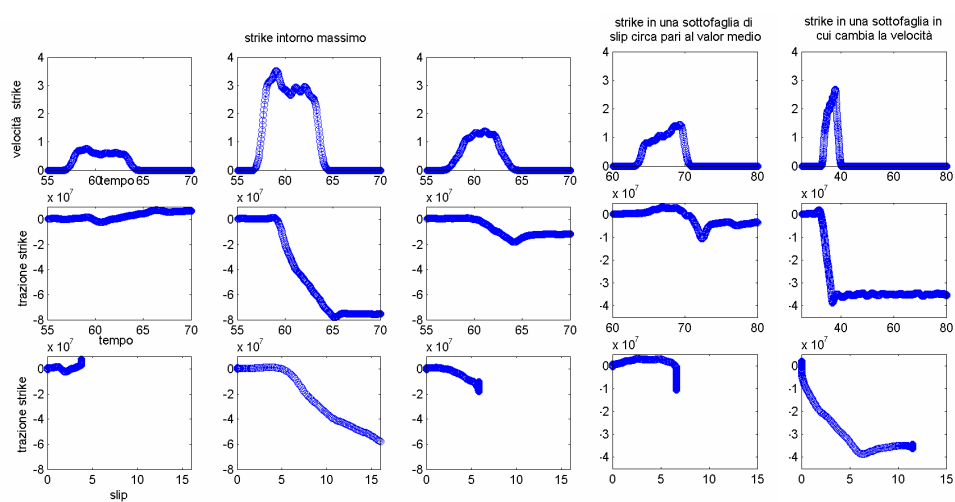
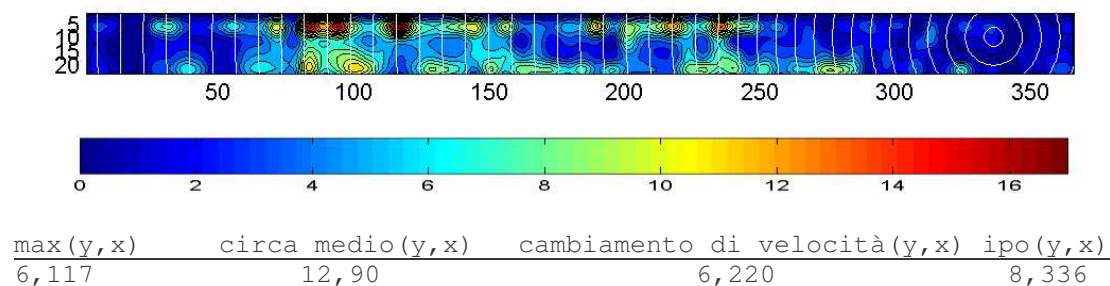


Figura 6: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

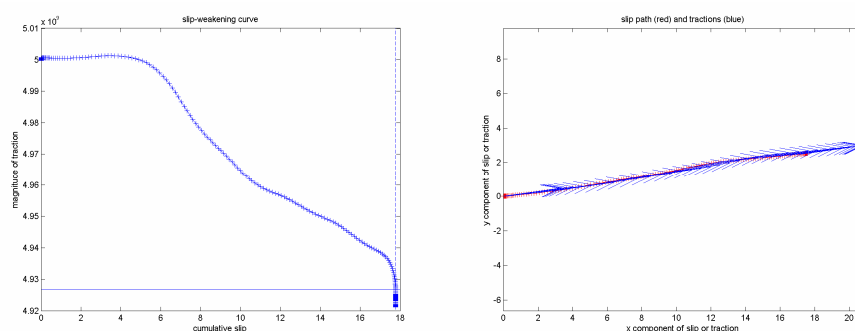
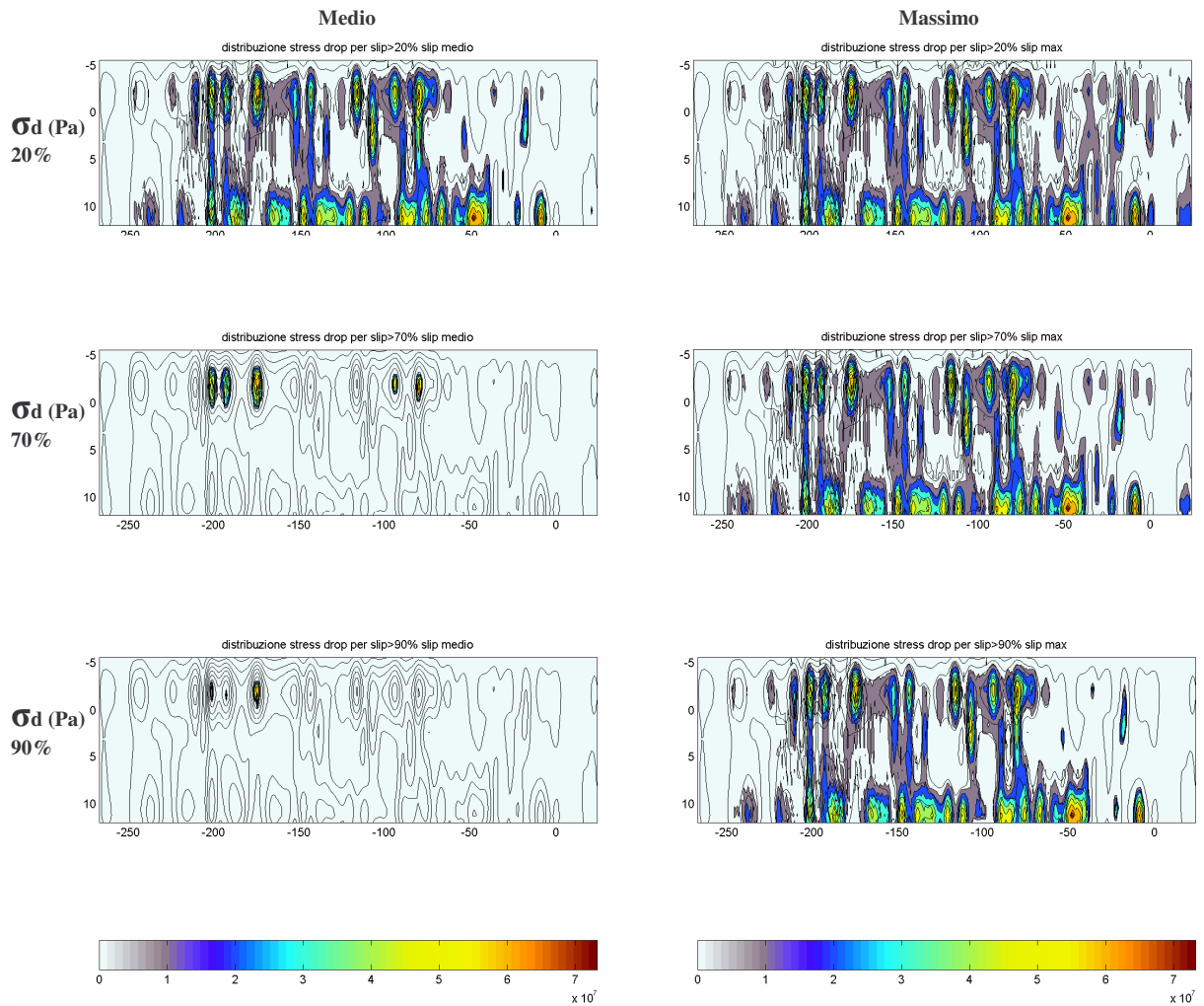
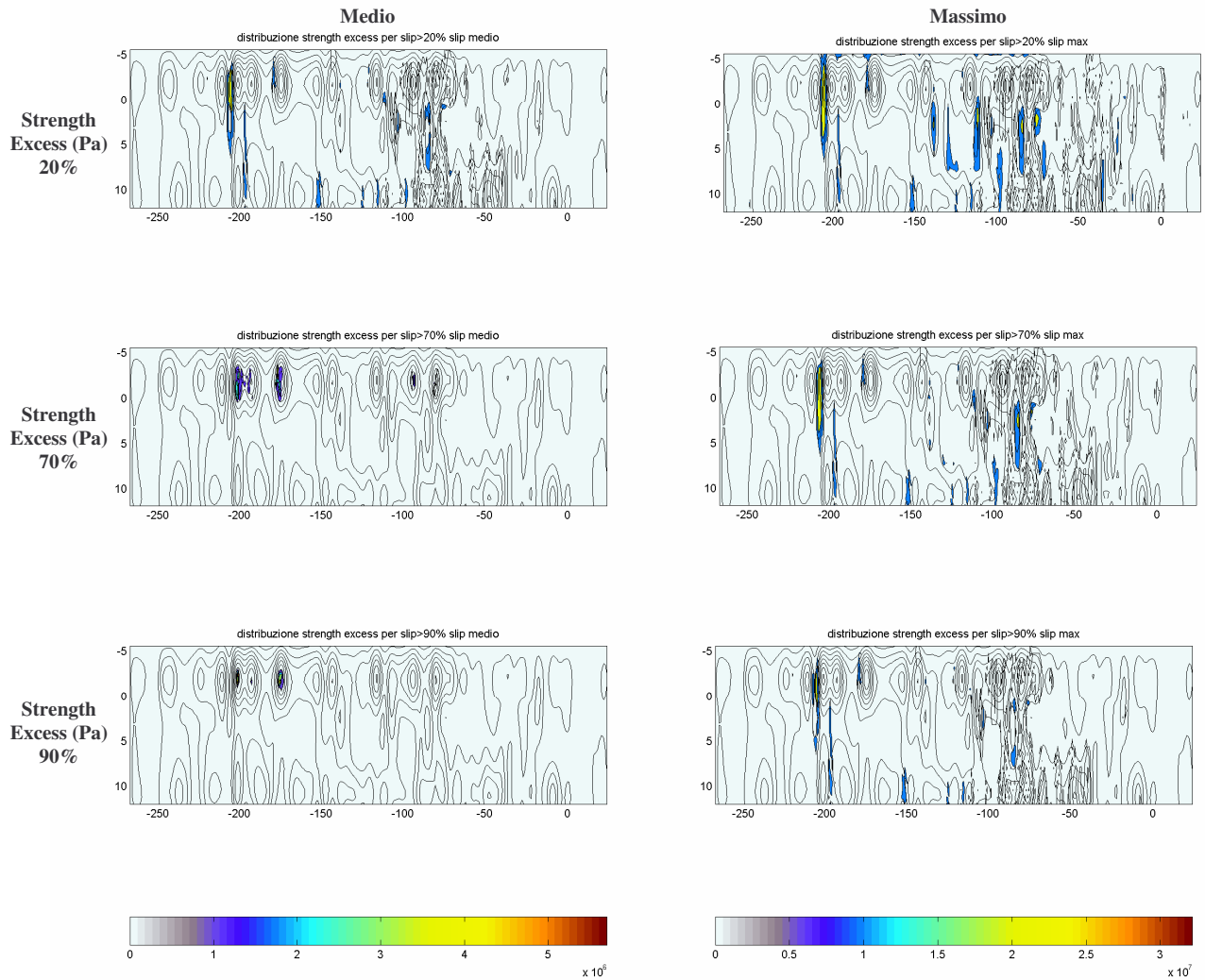


Figura 7: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.

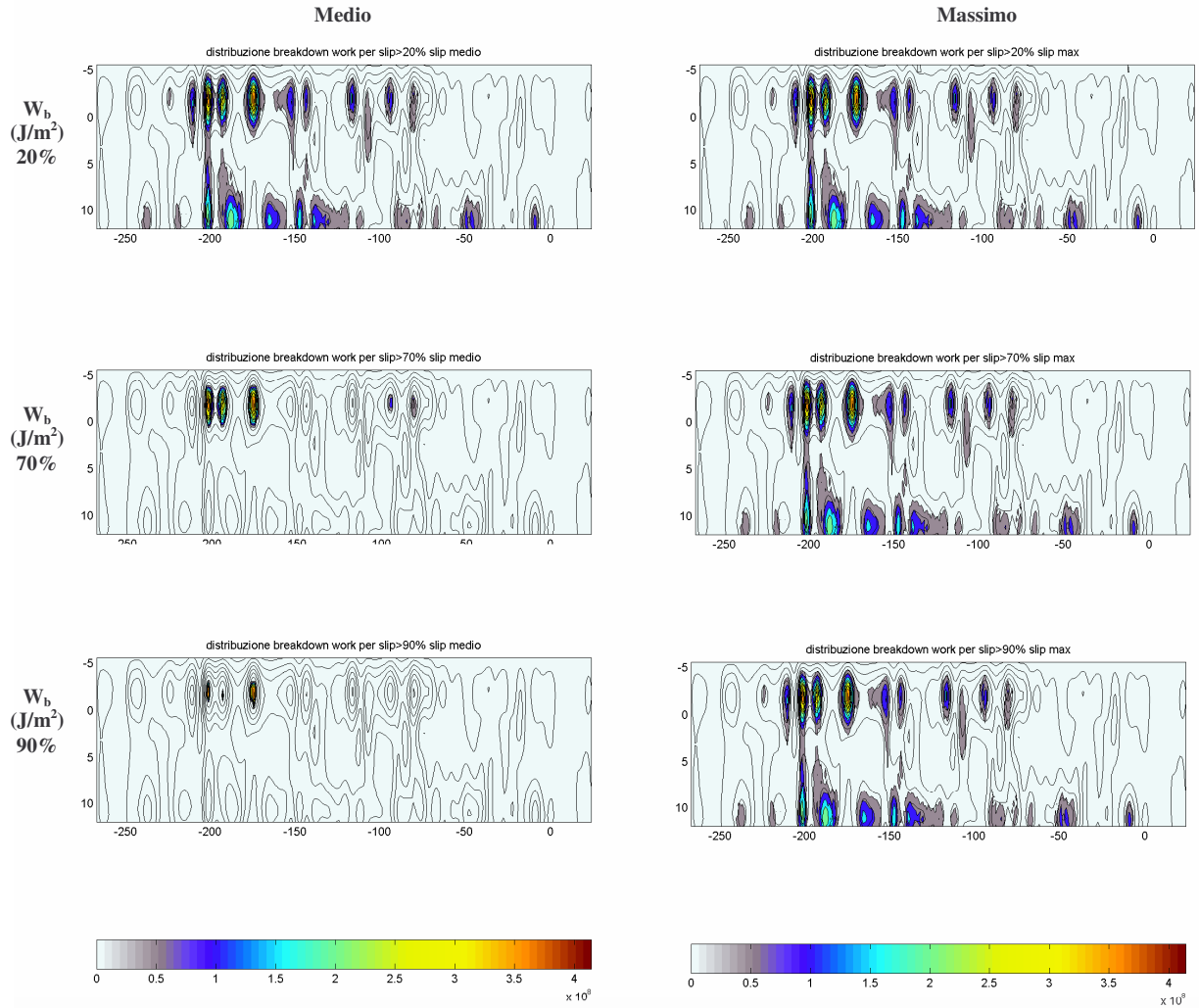


**Figura 8: distribuzione dello stress drop dinamico(Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



**Figura 9: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**





**Figura 10: distribuzione di breakdown work ( $\text{J/m}^2$ ):** colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)

Wb(J/m^2)	We(J/m^2)	Eb(J)	Ee(J)		
2.07e+007	2.19e+007	1.11e+017	1.18e+017		
stress(Pa)	strength(Pa)	breakstress(Pa)			
1.08e+007	2.85e+006	1.37e+007			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
2.21e+007	1.11e+017	3.99e+007	1.03e+017	3.31e+007	1.07e+017
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
8418	7855	4054	5073		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
3.72e+007	1.05e+017	3.62e+008	3.24e+015	2.05e+008	1.40e+016
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
8418	4417	14	107		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
1.15e+007	9.07e+010	1.79e+007	7.26e+010	1.58e+007	8.02e+010
>20(ave) Wsress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
1.70e+007	7.53e+010	5.70e+007	7.98e+008	4.10e+007	4.38e+009
>20(max) Wstrength	>20(max) strength	>90(max) Wstrength	>90(max) strength	>70(max) Wstrength	>70(max) strength
2.81e+006	2.21e+010	2.41e+006	9.76e+009	2.62e+006	1.33e+010
>20(ave) Wstrength	>20(ave) strength	>90(ave) Wstrength	>90(ave) strength	>70(ave) Wstrength	>70(ave) strength
2.53e+006	1.12e+010	2.89e+006	4.05e+007	2.17e+006	2.32e+008
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
17.8	4.3				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofoglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofoglie e a seguire il numero delle sottofoglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70 % e al 90 %. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

### 1.3 Parkfield

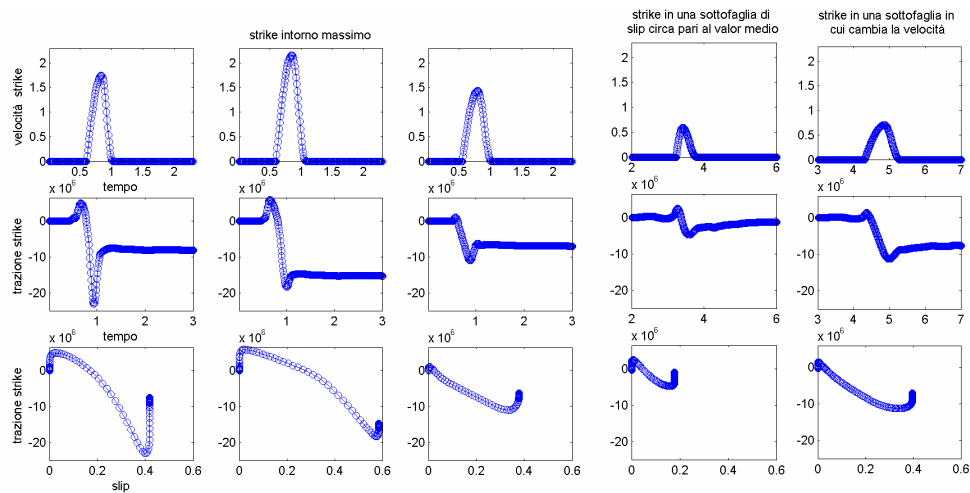
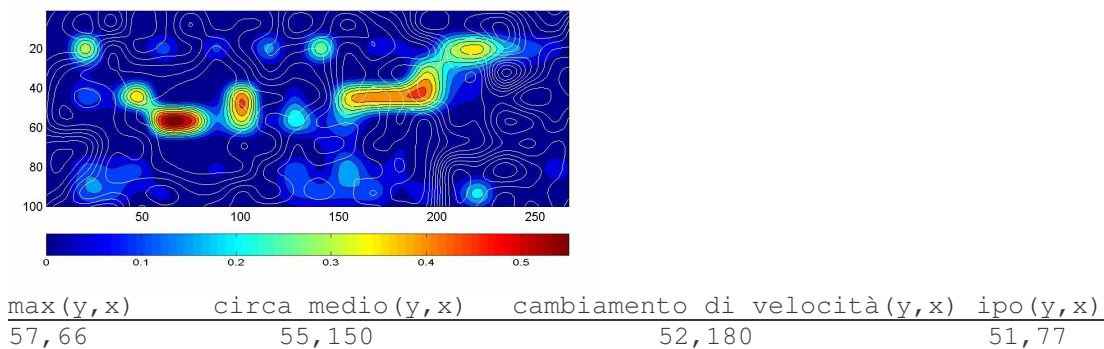


Figura 11: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

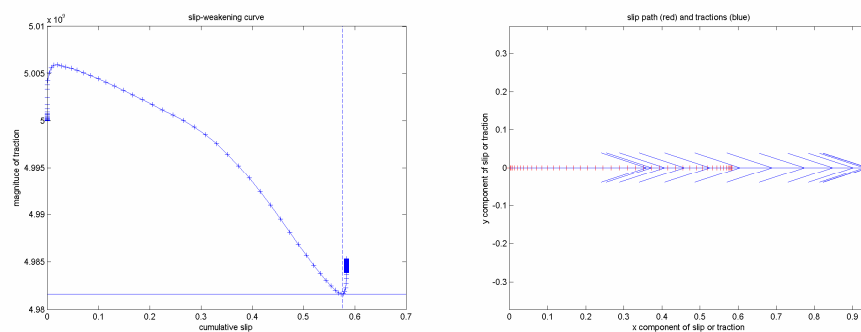
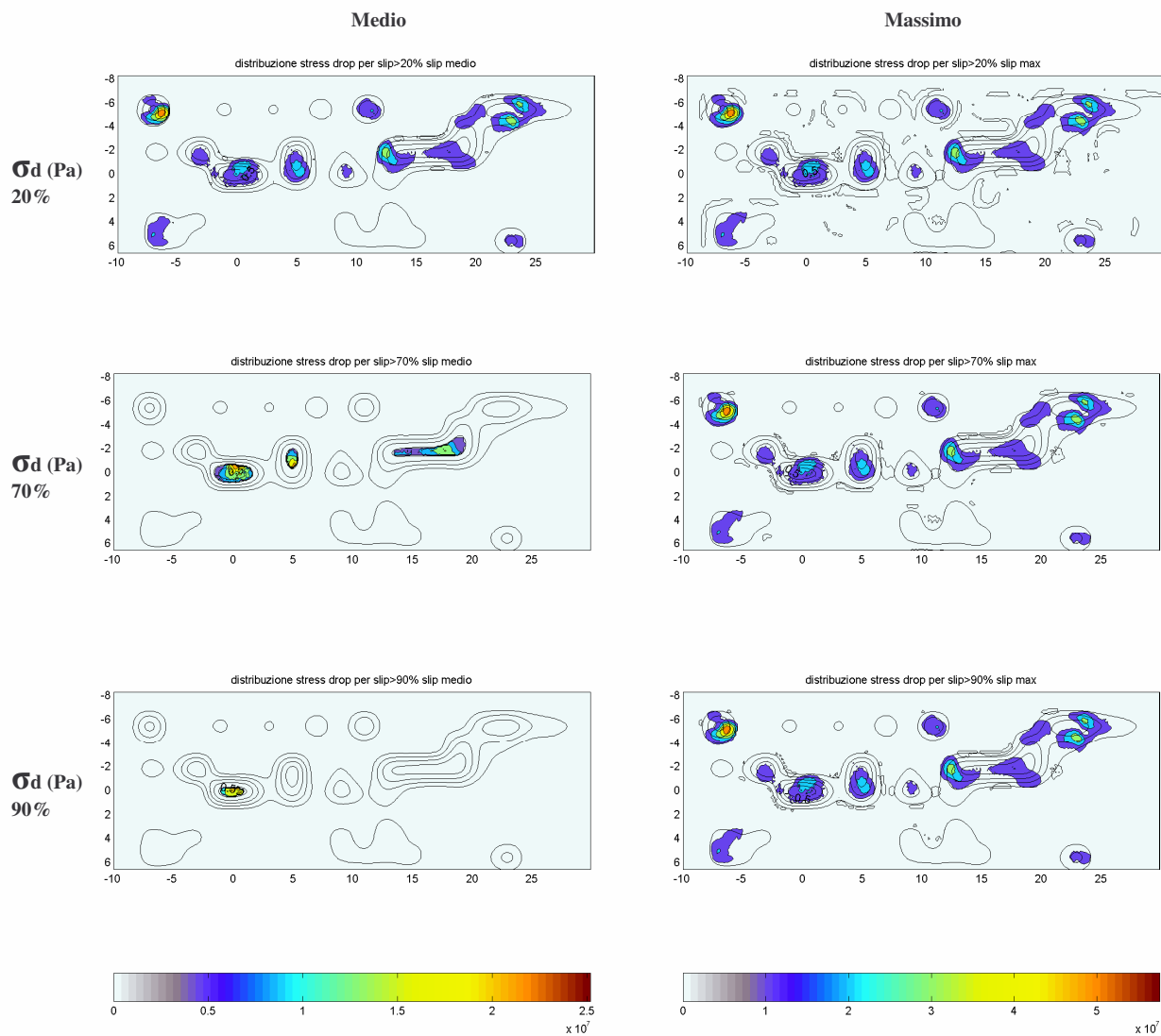
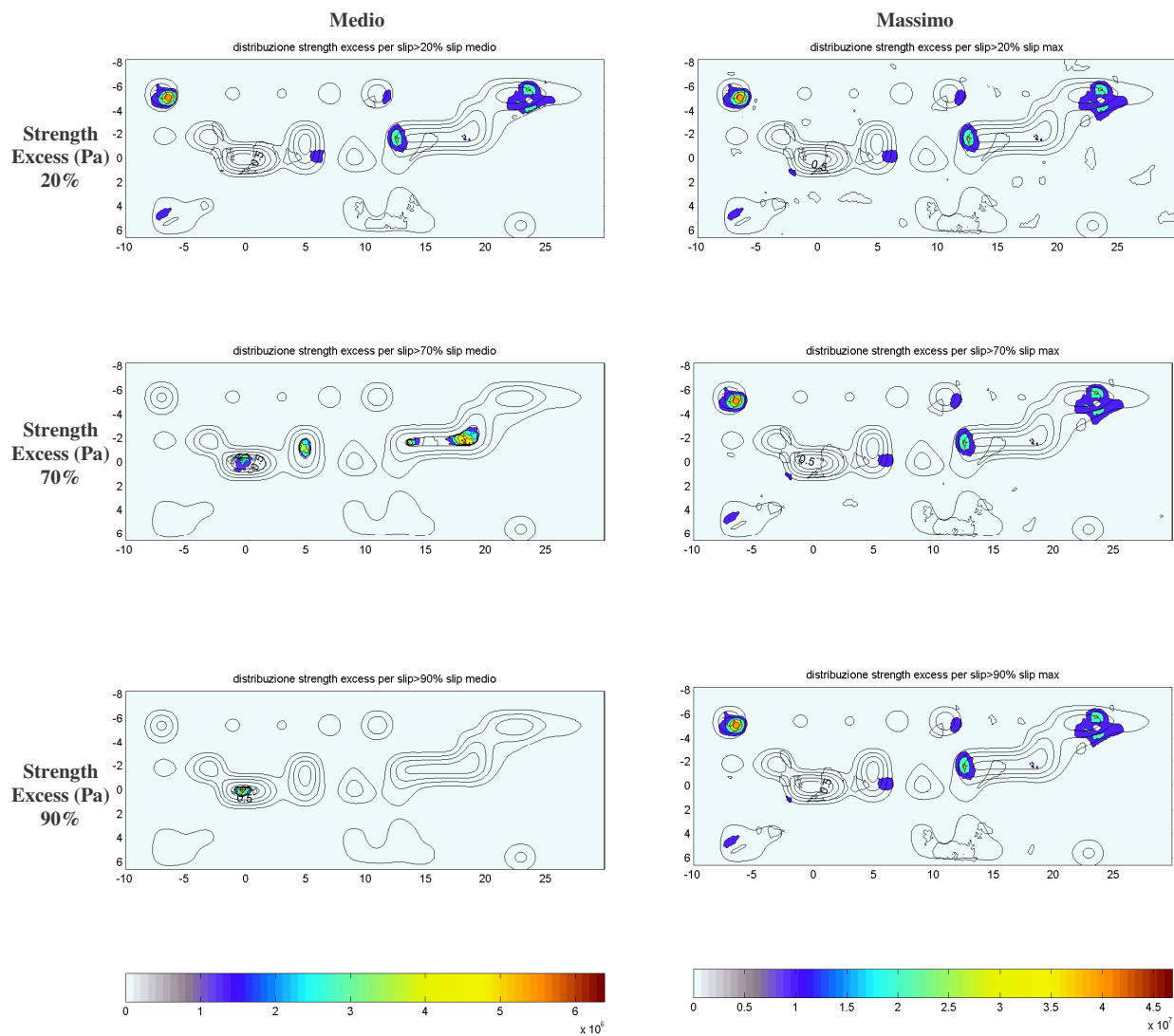


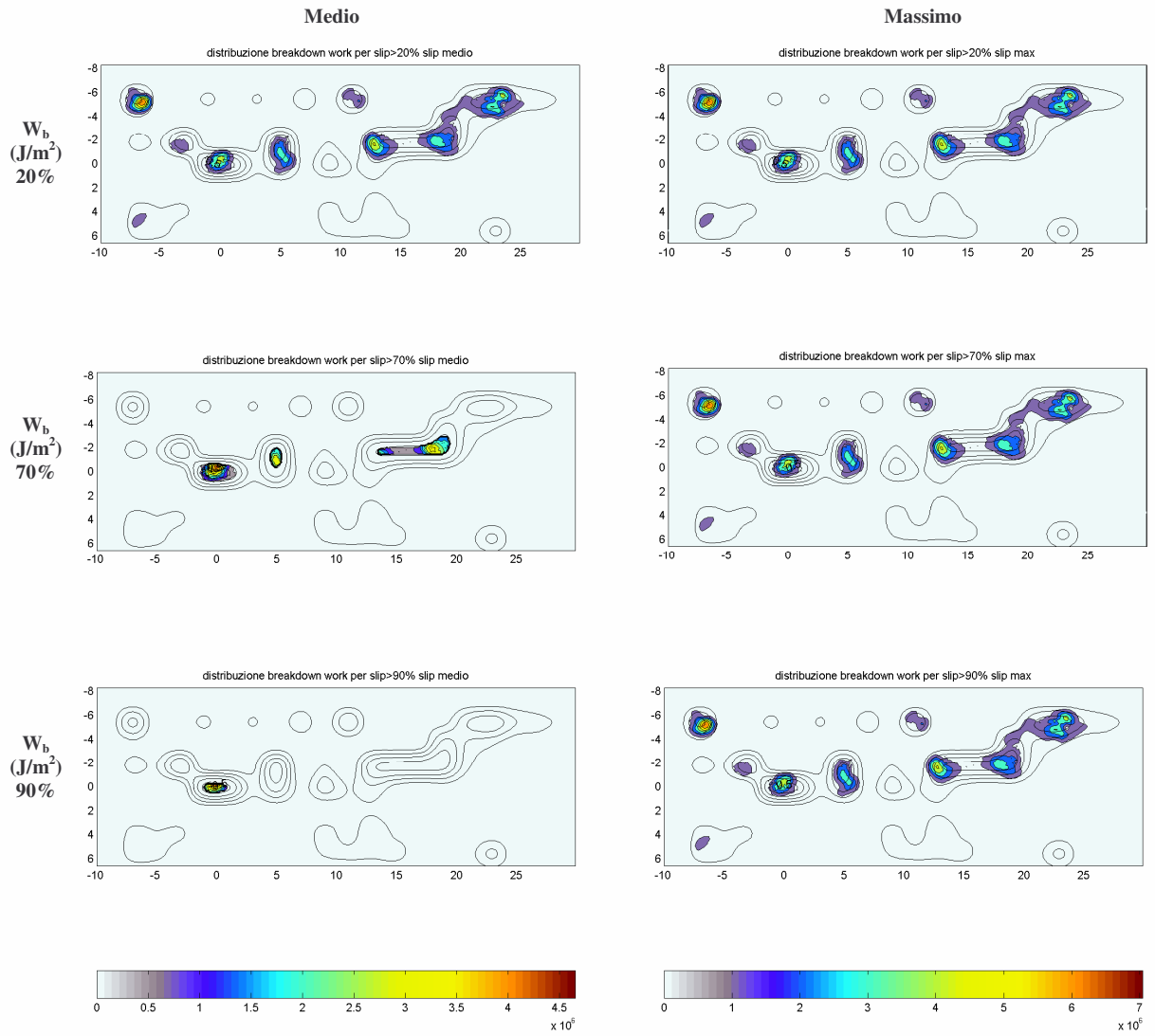
Figura 12: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.



**Figura 13: distribuzione dello stress drop dinamico(Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



**Figura 14: distribuzione strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**

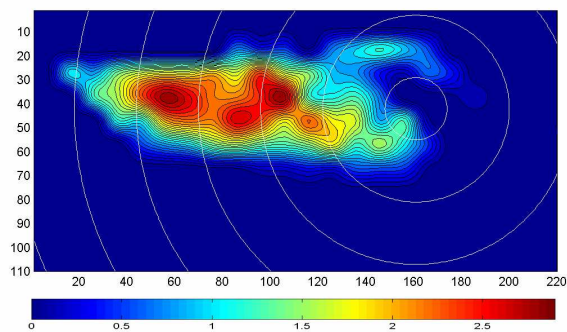


**Figura 15:** distribuzione del breakdown work ( $\text{J/m}^2$ ): colonna a sinistra per sottofoglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofoglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)

Wb(J/m^2)	We(J/m^2)	Eb(J)	Ee(J)		
2.09e+005	2.12e+005	1.26e+014	1.27e+014		
stress(Pa)	strength(Pa)	breakstress(Pa)			
2.78e+006	1.79e+006	4.57e+006			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
3.31e+005	1.25e+014	5.73e+005	1.21e+014	4.96e+005	1.23e+014
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
26700	16824	9402	11038		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
8.90e+005	1.10e+014	2.87e+006	3.42e+012	2.04e+006	1.97e+013
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
26700	5481	53	429		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
4.34e+006	7.31e+010	6.85e+006	6.44e+010	6.14e+006	6.78e+010
>20(ave) Wsress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
9.32e+006	5.11e+010	1.79e+007	9.51e+008	1.43e+007	6.13e+009
>20(max) Wstrenght	>20(max) strenght	>90(max) Wstrenght	>90(max) strenght	>70(max) Wstrenght	>70(max) strenght
2.56e+006	4.31e+010	3.49e+006	3.28e+010	3.22e+006	3.56e+010
>20(ave) Wstrenght	>20(ave) strenght	>90(ave) Wstrenght	>90(ave) strenght	>70(ave) Wstrenght	>70(ave) strenght
4.41e+006	2.42e+010	2.66e+006	1.41e+008	3.32e+006	1.43e+009
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
0.6	0.1				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofaglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofaglie e a seguire il numero delle sottofaglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70% e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

## 1.4 San Simeon



$\max(y, x)$	$\text{circa medio}(y, x)$		$\text{cambiamento di velocità}(y, x)$	$\text{ipo}(y, x)$
37,104	40,180	40,120	vel. cost.	41,161

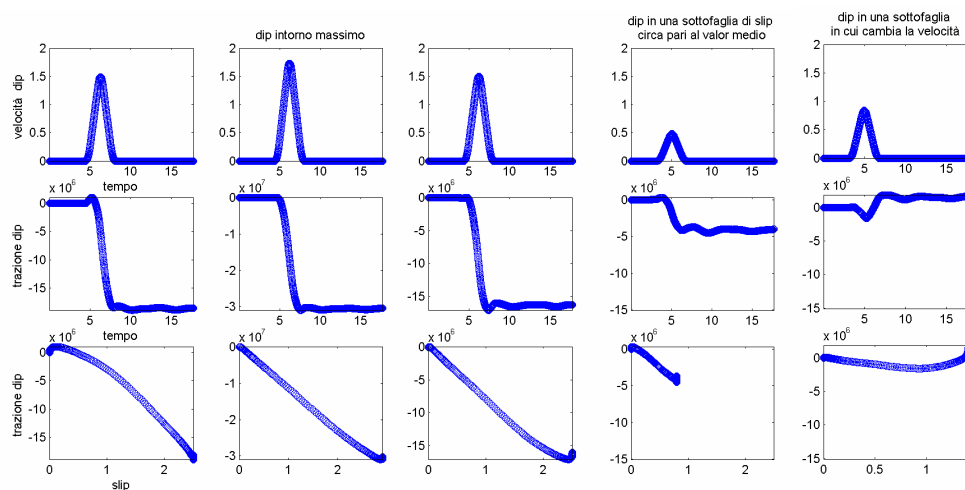


Figura 16: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

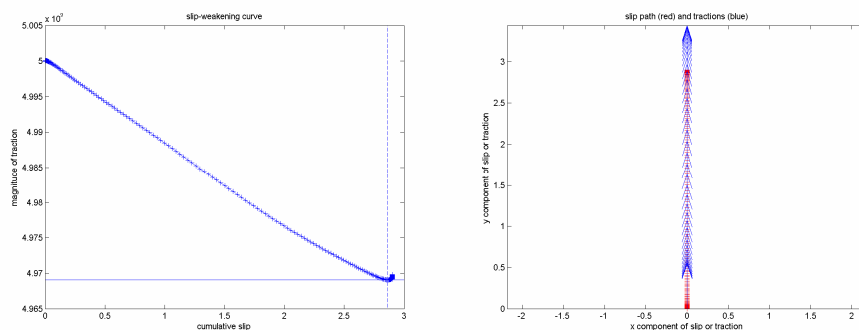
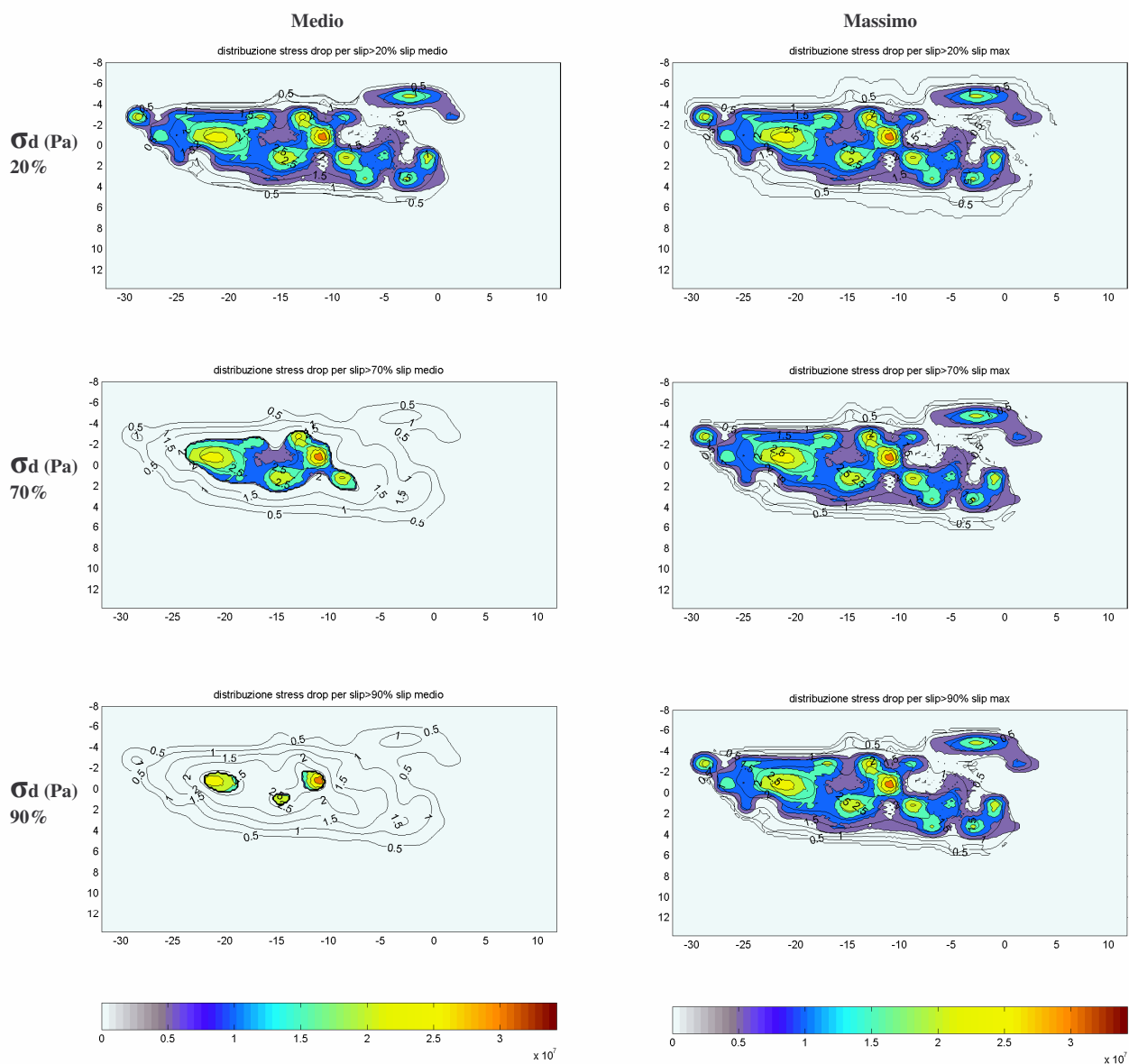
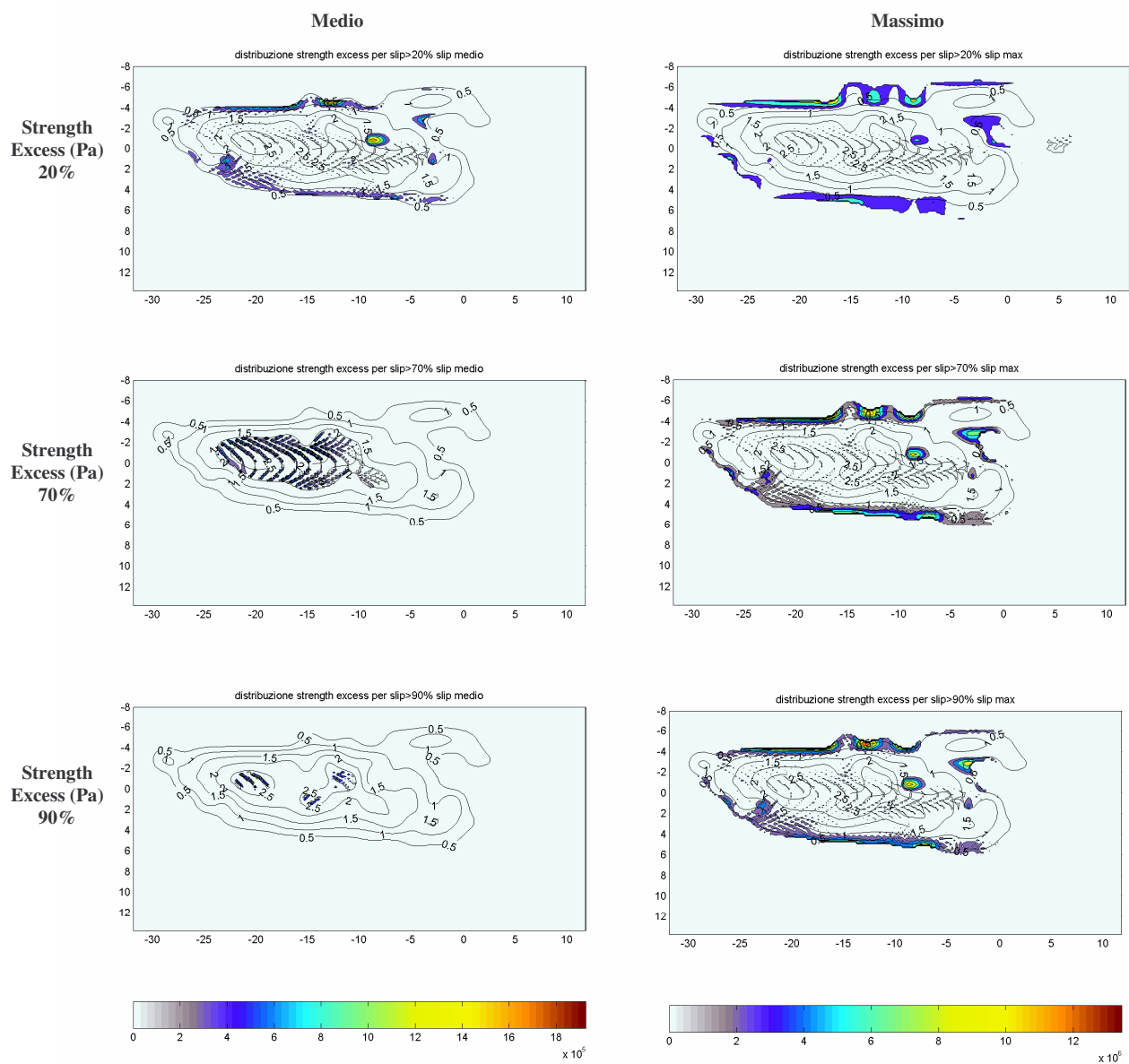


Figura 17: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.

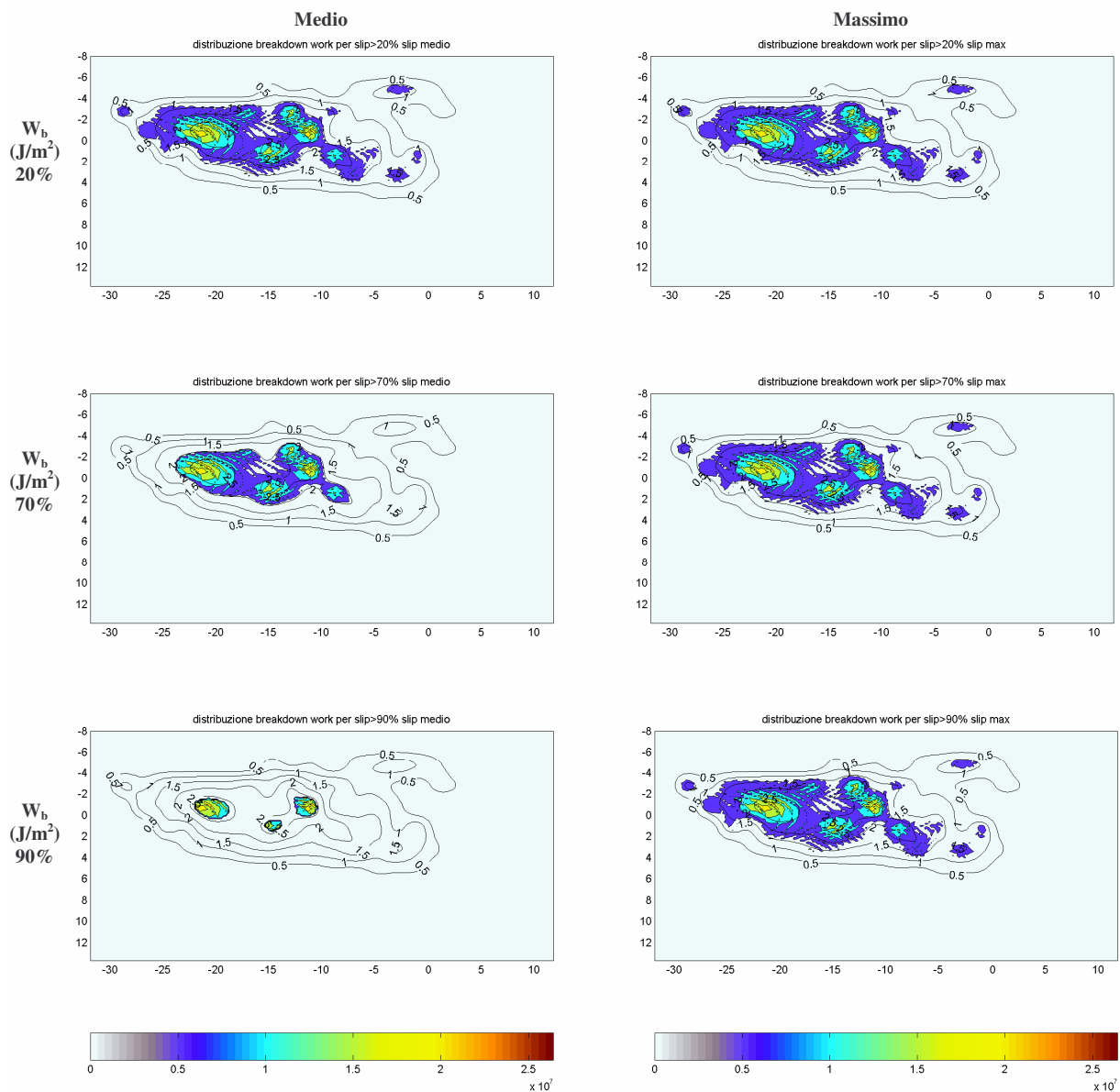




**Figura 18: distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



**Figura 19: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**

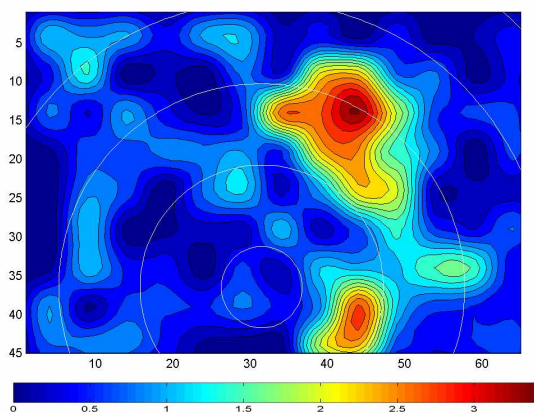


**Figura 20:** distribuzione del breakdown work ( $\text{J/m}^2$ ): colonna a sinistra per sottoglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottoglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)

Wb(J/m <sup>2</sup> )	We(J/m <sup>2</sup> )	Eb(J)	Ee(J)		
1.15e+006	1.21e+006	1.11e+015	1.17e+015		
stress(Pa)	strength(Pa)		breakstress(Pa)		
2.47e+006	1.13e+006	3.60e+006			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
3.23e+006	1.11e+015	4.04e+006	1.11e+015	3.84e+006	1.11e+015
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
24200	8625	6868	7238		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
4.61e+006	1.10e+015	1.59e+007	1.47e+014	1.02e+007	5.96e+014
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
24200	5966	230	1455		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
7.09e+006	6.12e+010	8.83e+006	6.06e+010	8.41e+006	6.09e+010
>20(ave) Wsress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
9.91e+006	5.91e+010	2.34e+007	5.38e+009	1.69e+007	2.45e+010
>20(max) Wstrength	>20(max) strength	>90(max) Wstrength	>90(max) strength	>70(max) Wstrength	>70(max) strength
1.97e+006	1.70e+010	1.19e+006	8.19e+009	1.35e+006	9.76e+009
>20(ave) Wstrength	>20(ave) strength	>90(ave) Wstrength	>90(ave) strength	>70(ave) Wstrength	>70(ave) strength
8.87e+005	5.29e+009	3.64e+005	8.37e+007	4.50e+005	6.54e+008
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
2.9	0.4				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofaglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofaglie e a seguire il numero delle sottofaglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70% e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

## 1.5 Fukuoka



$\max(y, x)$	circa medio( $y, x$ )		cambiamento di velocità( $y, x$ )	ipo( $y, x$ )
14,44	27,30	27,42	vel. Cost.	38,33

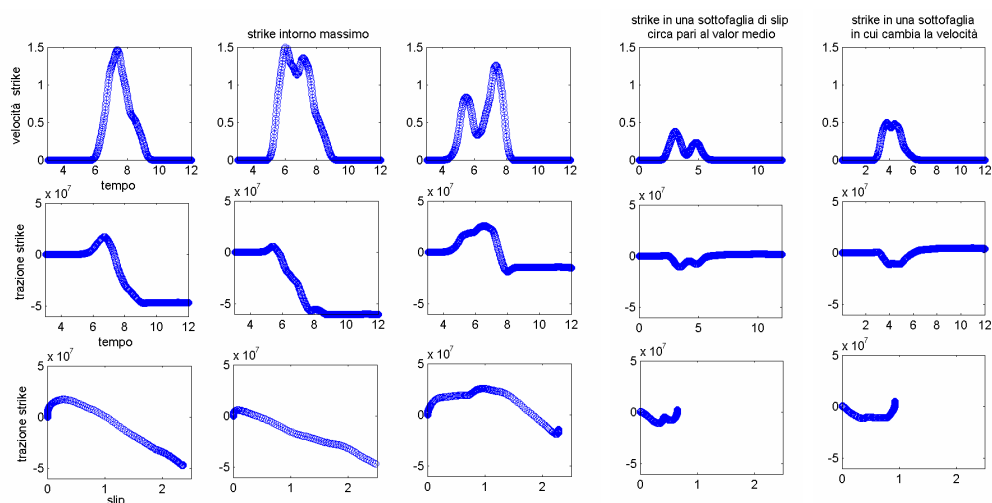


Figura 21: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

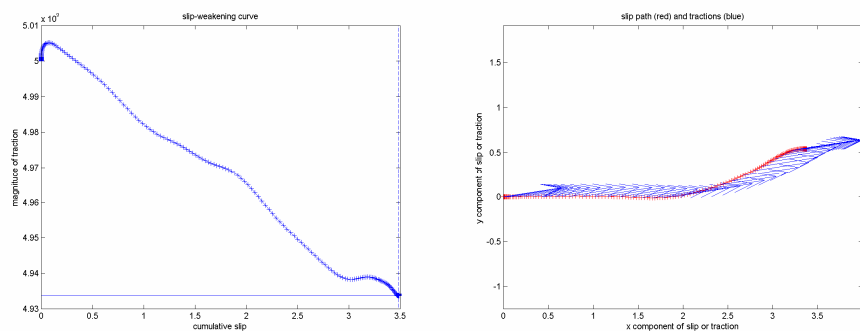


Figura 22: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.

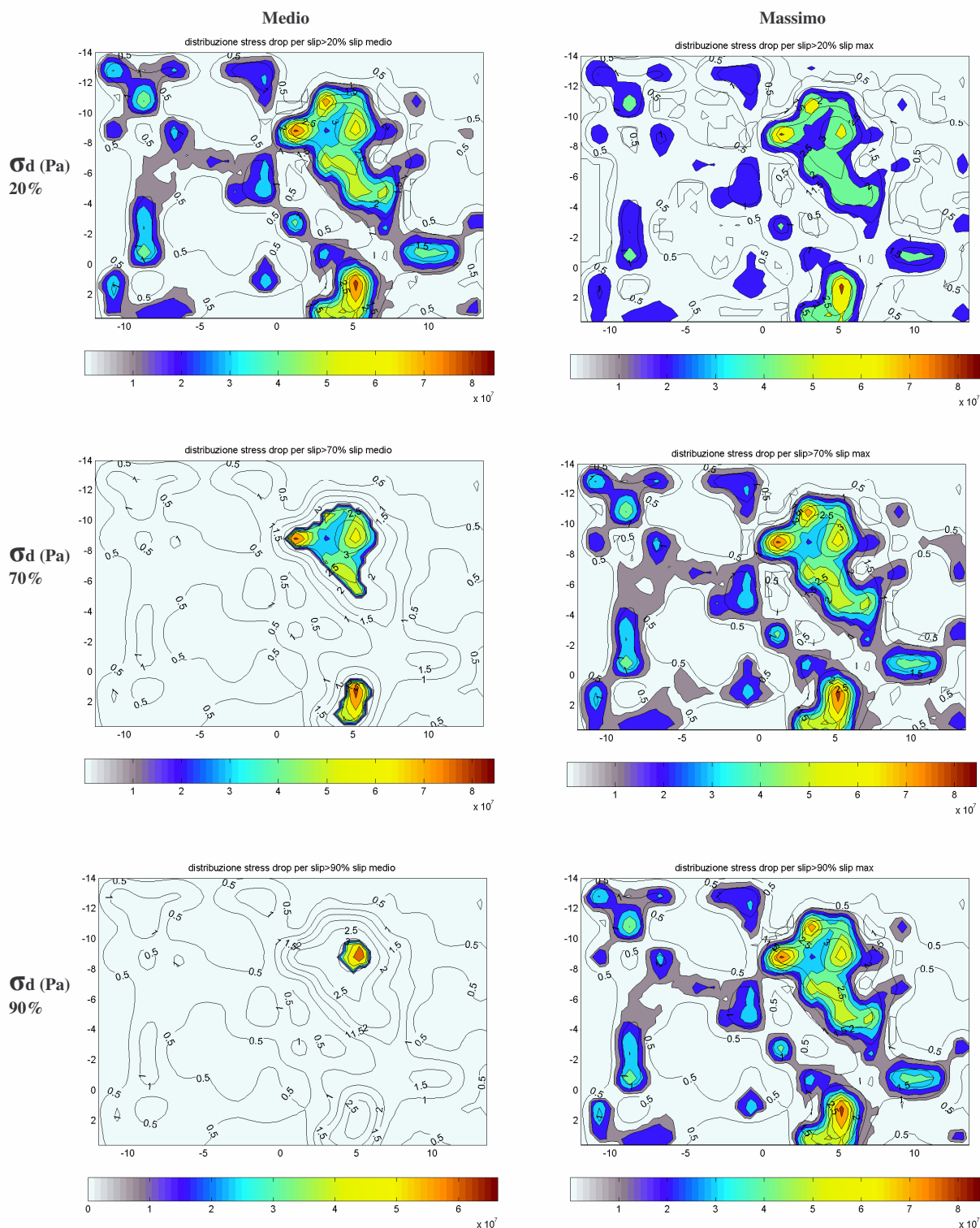
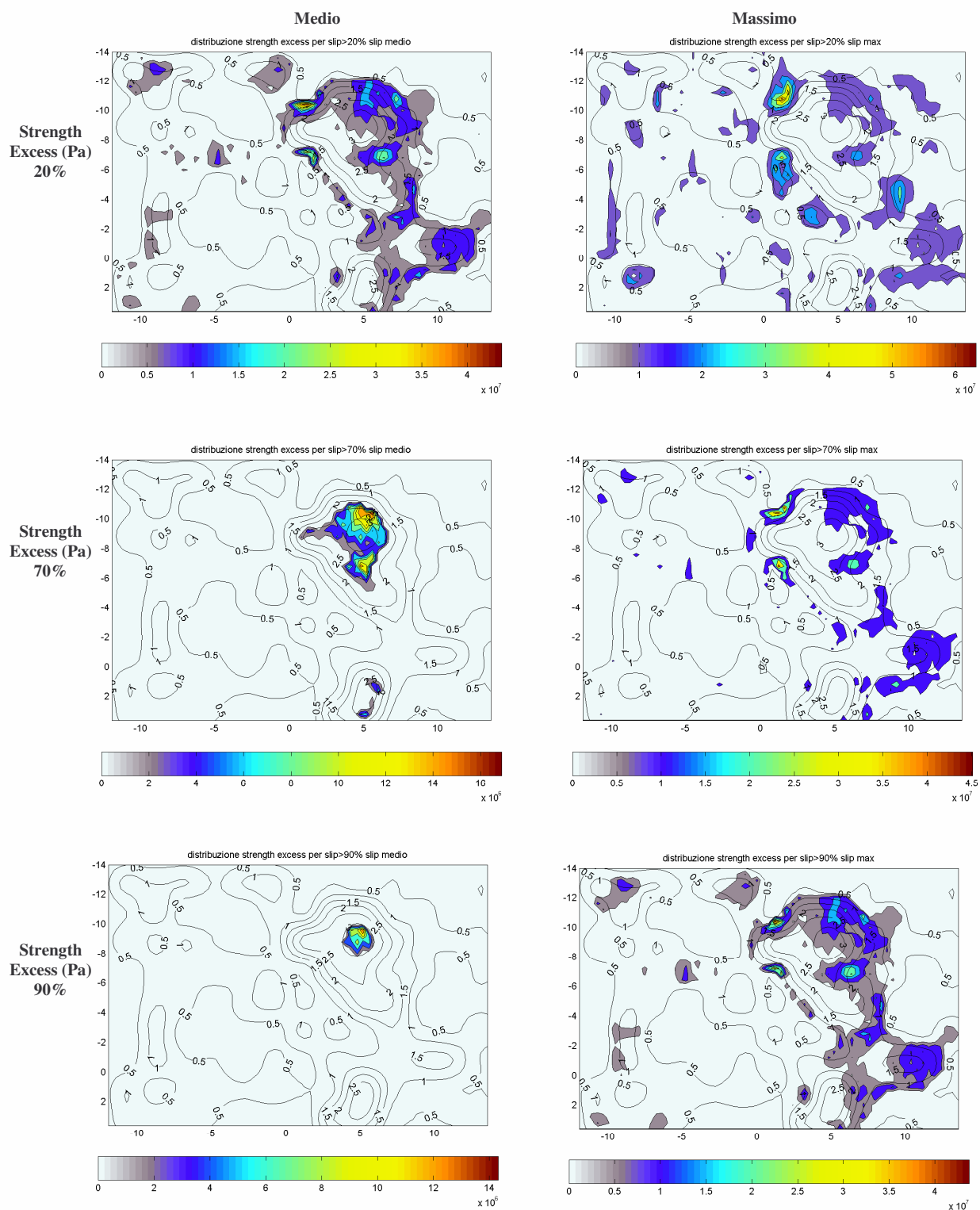
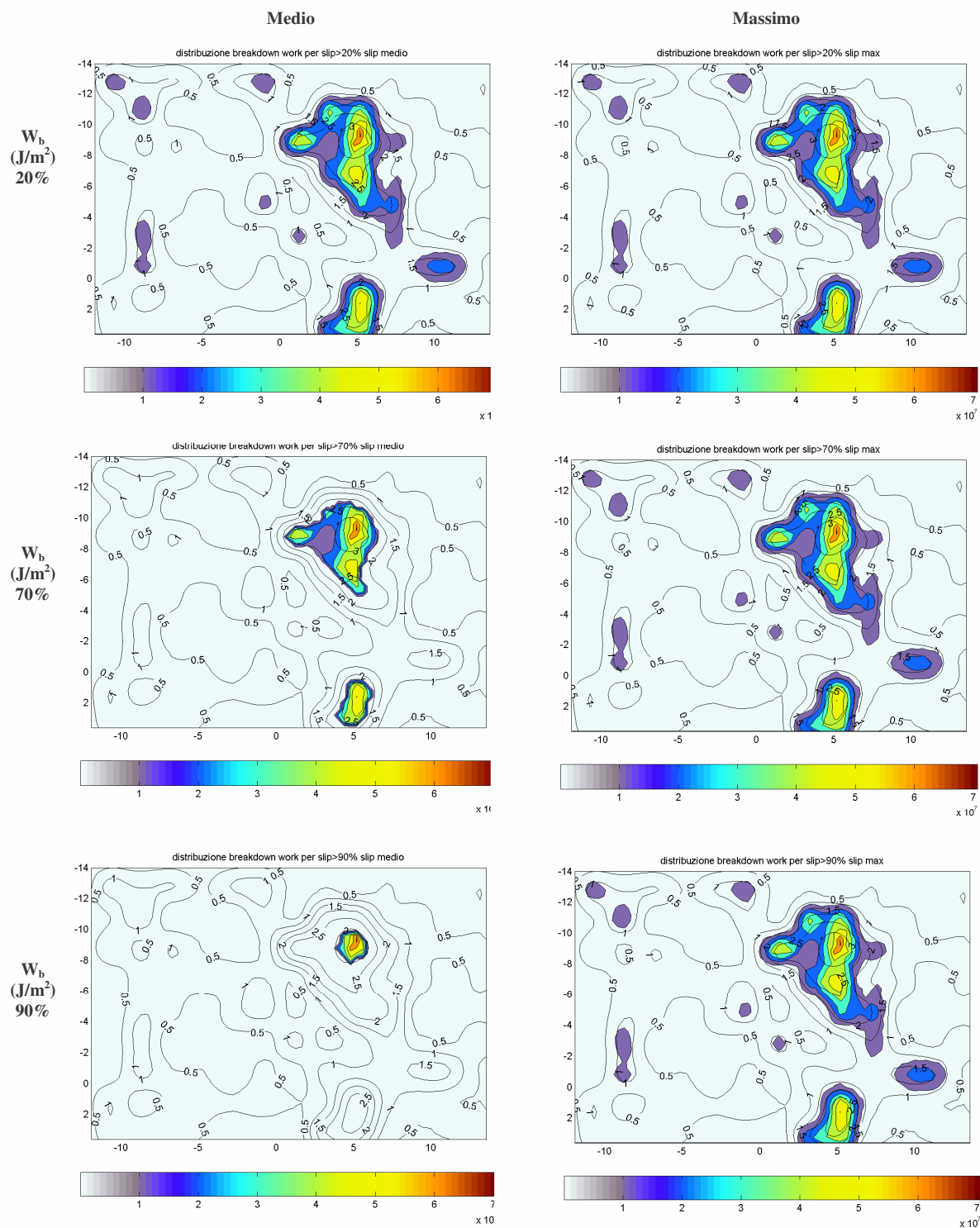


Figura 23: distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. Inbianco è riportato lo slip (m)



**Figura 24: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**





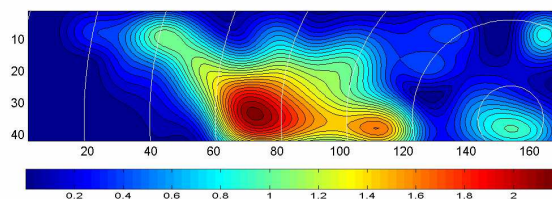
**Figura 25: distribuzione del Breakdown work (J/m<sup>2</sup>):** colonna a sinistra per sottofoglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofoglie di slip >20%, 70 %, 90 % dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)



Wb(J/m <sup>2</sup> )	We(J/m <sup>2</sup> )	Eb(J)	Ee(J)		
5.34e+006	5.75e+006	2.50e+015	2.69e+015		
stress(Pa)	strength(Pa)		breakstress(Pa)		
1.29e+007	6.40e+006	1.93e+007			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
5.80e+006	2.50e+015	1.12e+007	2.22e+015	8.75e+006	2.38e+015
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
2925	2693	1234	1702		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
1.05e+007	2.27e+015	4.95e+007	1.35e+014	3.74e+007	8.39e+014
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
2925	1346	17	140		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
1.41e+007	3.79e+010	2.43e+007	3.00e+010	2.03e+007	3.45e+010
>20(ave) Wsress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
2.33e+007	3.14e+010	5.27e+007	8.97e+008	5.01e+007	7.01e+009
>20(max) Wstrenght	>20(max) strenght	>90(max) Wstrenght	>90(max) strenght	>70(max) Wstrenght	>70(max) strenght
6.23e+006	1.68e+010	5.38e+006	6.64e+009	5.45e+006	9.28e+009
>20(ave) Wstrenght	>20(ave) strenght	>90(ave) Wstrenght	>90(ave) strenght	>70(ave) Wstrenght	>70(ave) strenght
5.39e+006	7.25e+009	7.13e+006	1.21e+008	5.20e+006	7.29e+008
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
3.4	0.8				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofoglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofoglie e a seguire il numero delle sottofoglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70% e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

## 1.6 Imperial Valley



$\max(y, x)$	circa medio( $y, x$ )	cambiamento di velocità( $y, x$ )	ipo( $y, x$ )
34,73	17,90	25,70	33,153
		vel. cost	

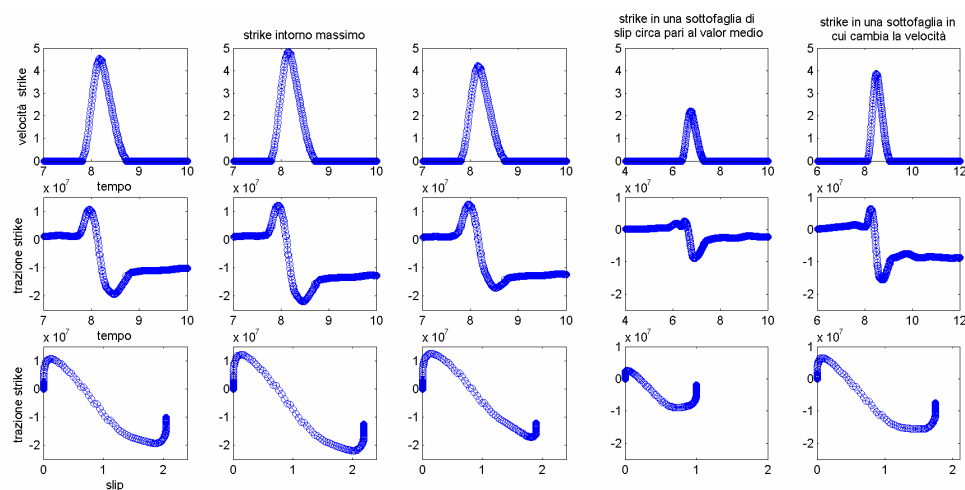


Figura 26: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

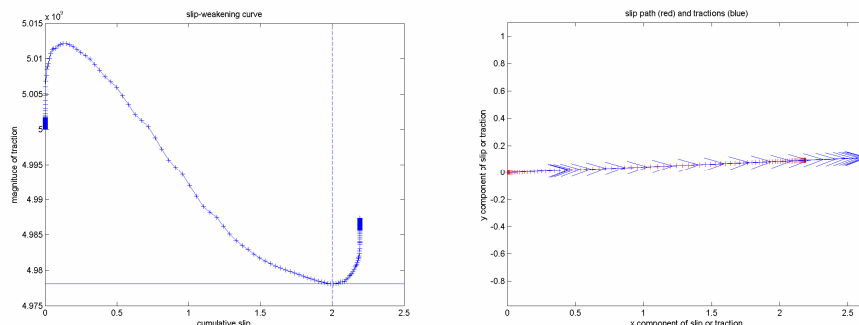
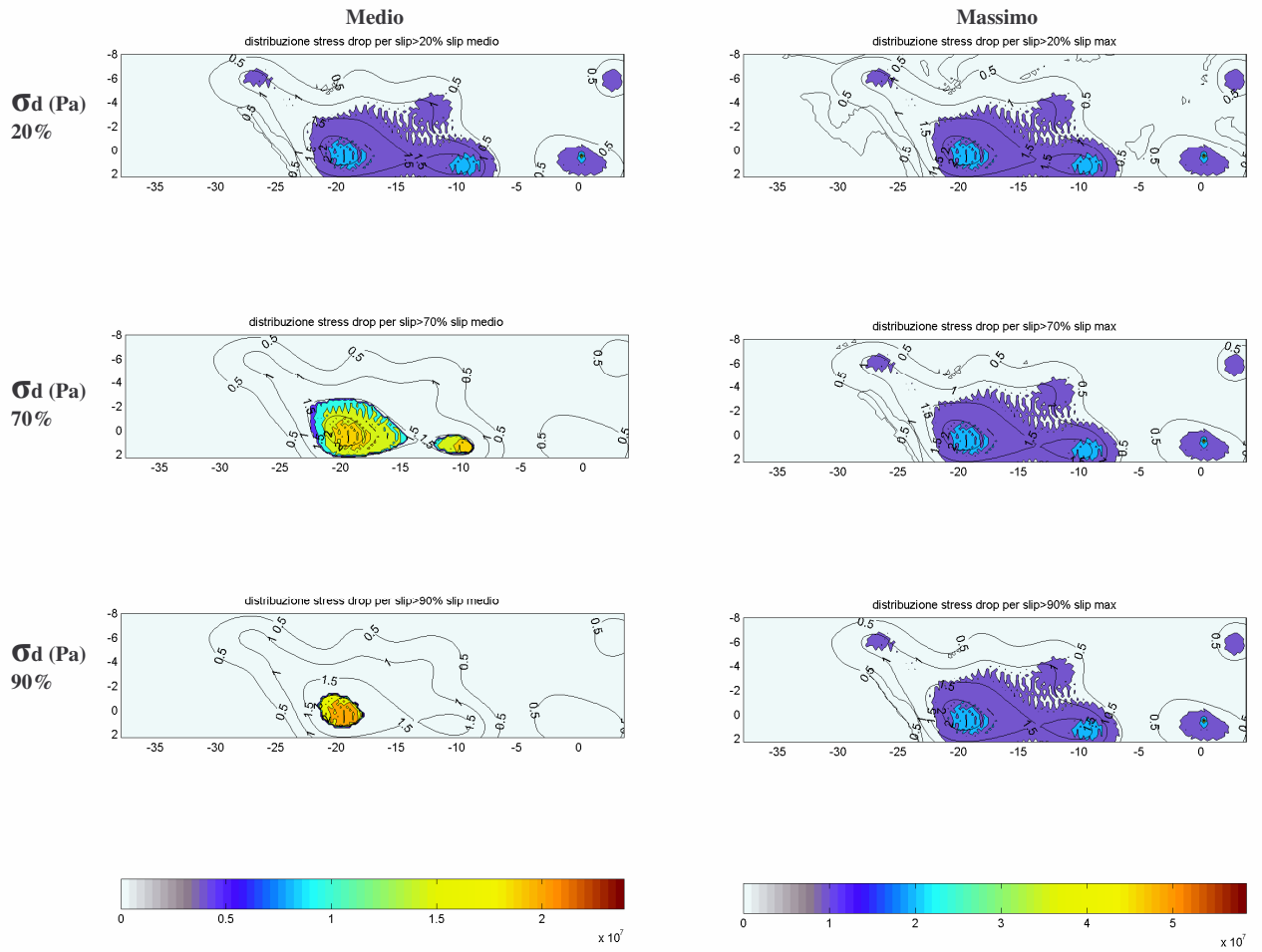
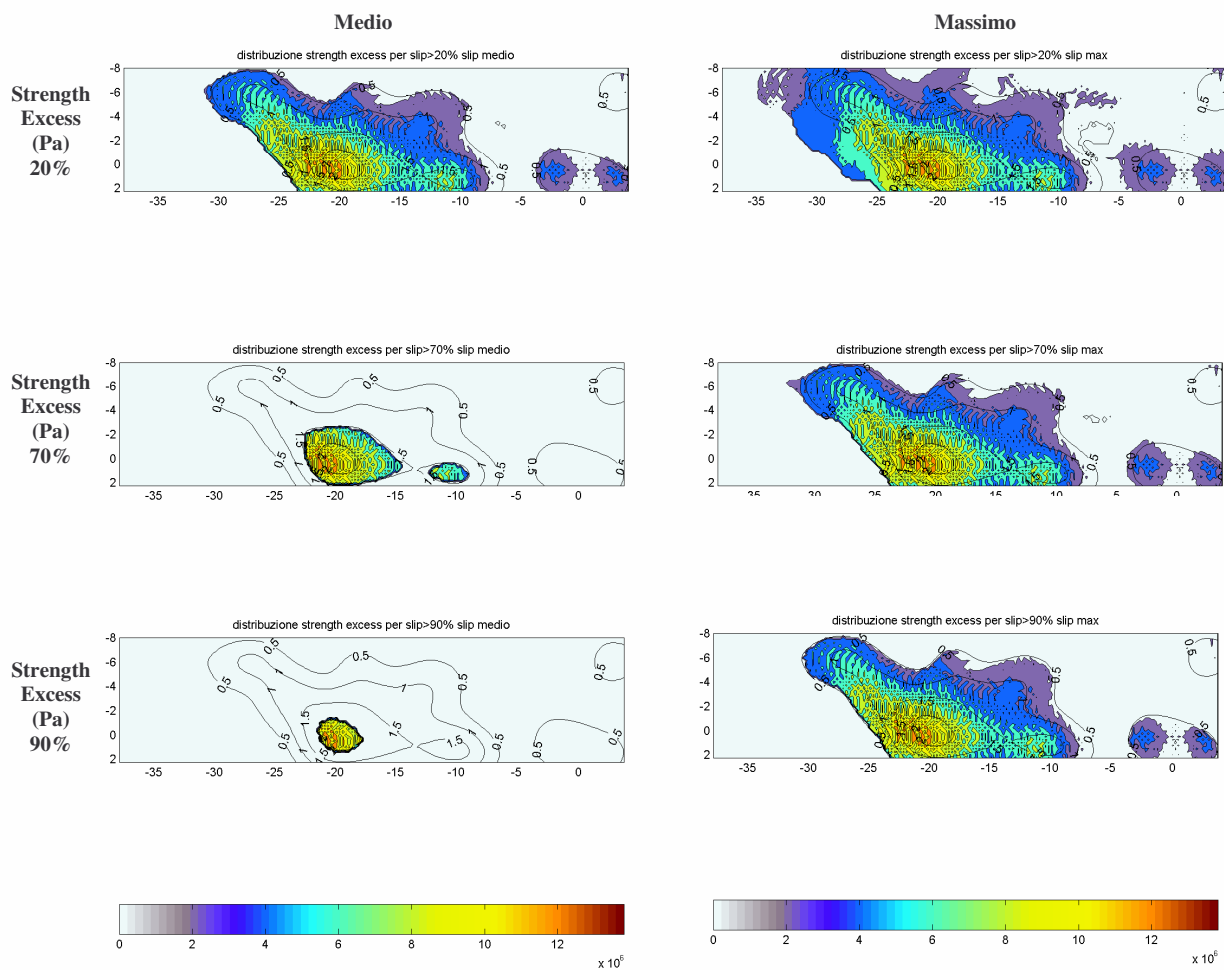


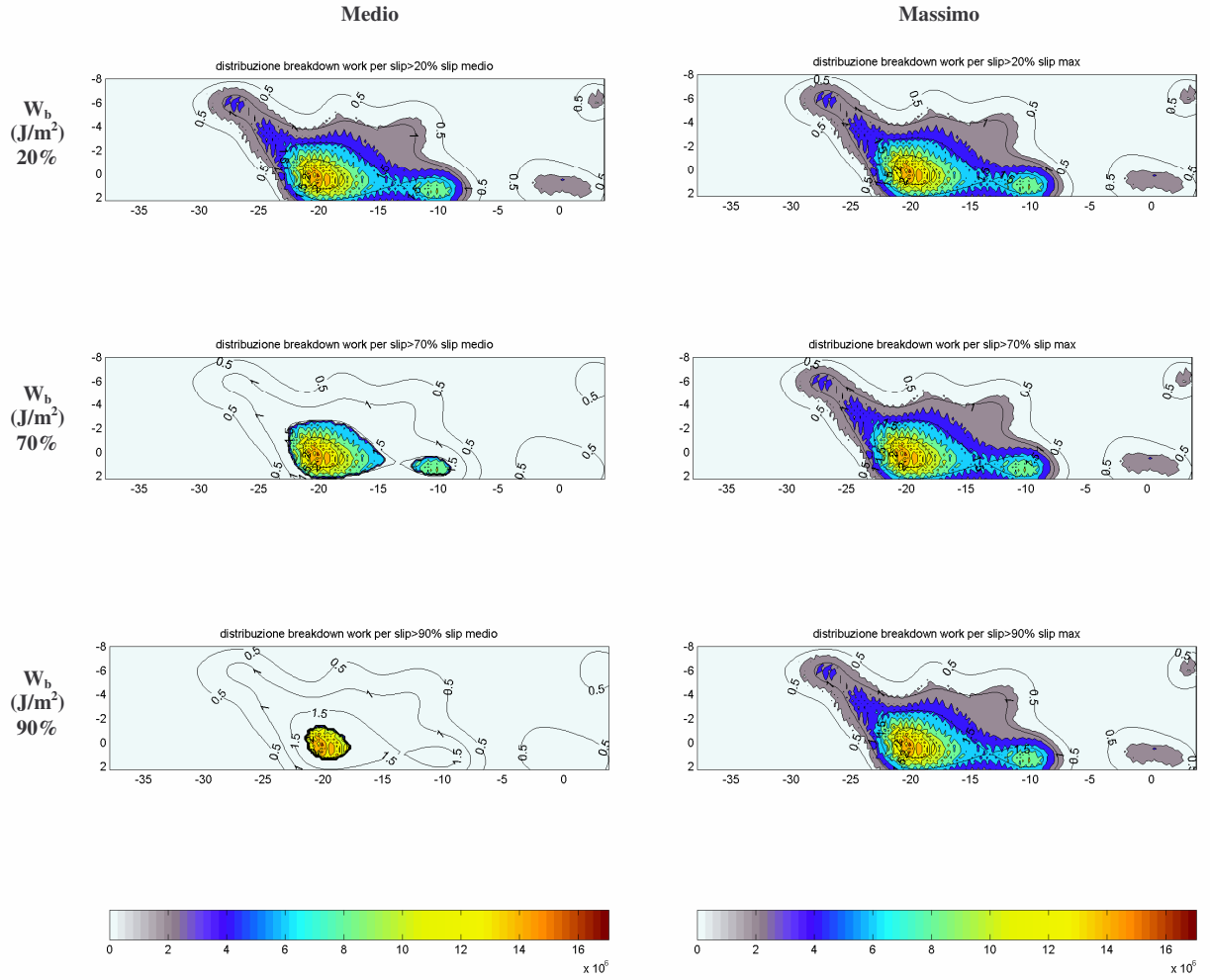
Figura 27: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.



**Figura 28:** distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. Inbianco è riportato lo slip (m)



**Figura 29: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofoglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofoglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



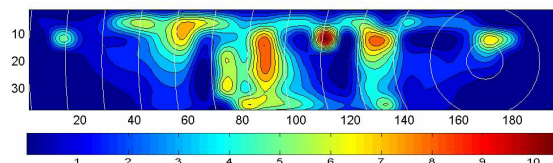
**Figura 30: distribuzione del Breakdown work ( $J/m^2$ ): colonna a sinistra per sottofaglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**

Wb(J/m <sup>2</sup> )	We(J/m <sup>2</sup> )	Eb(J)	Ee(J)		
1.78e+006	1.85e+006	7.85e+014	8.15e+014		
stress(Pa)	strength(Pa)	breakstress(Pa)			
4.76e+006	3.55e+006	8.30e+006			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
2.23e+006	7.84e+014	4.06e+006	7.39e+014	3.47e+006	7.59e+014
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
7056	5619	2913	3497		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
3.67e+006	7.52e+014	1.32e+007	9.71e+013	9.72e+006	3.13e+014
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
7056	3284	118	516		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
6.01e+006	3.38e+010	9.87e+006	2.88e+010	8.81e+006	3.08e+010
>20(ave) Wsress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
9.15e+006	3.01e+010	2.00e+007	2.36e+009	1.68e+007	8.66e+009
>20(max) Wstrength	>20(max) strength	>90(max) Wstrength	>90(max) strength	>70(max) Wstrength	>70(max) strength
3.97e+006	2.23e+010	5.50e+006	1.60e+010	5.03e+006	1.76e+010
>20(ave) Wstrength	>20(ave) strength	>90(ave) Wstrength	>90(ave) strength	>70(ave) Wstrength	>70(ave) strength
5.20e+006	1.71e+010	1.05e+007	1.23e+009	8.85e+006	4.57e+009
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
2.2	0.6				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofoglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofoglie e a seguire il numero delle sottofoglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70 % e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

## 1.7 Landers

### 1.7.1 Wald e Heaton



$\max(y, x)$	circa medio( $y, x$ )	cambiamento di velocità( $y, x$ )	ipo( $y, x$ )
12,111	17,58	7,100	20,170

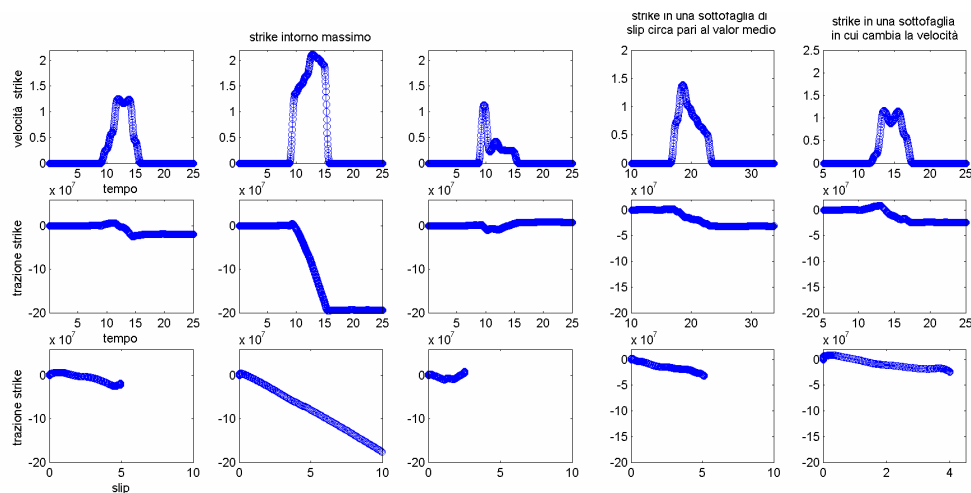


Figura 31: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

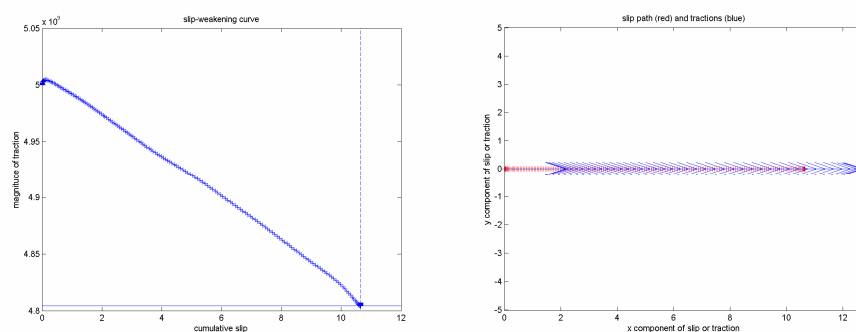


Figura 32: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.

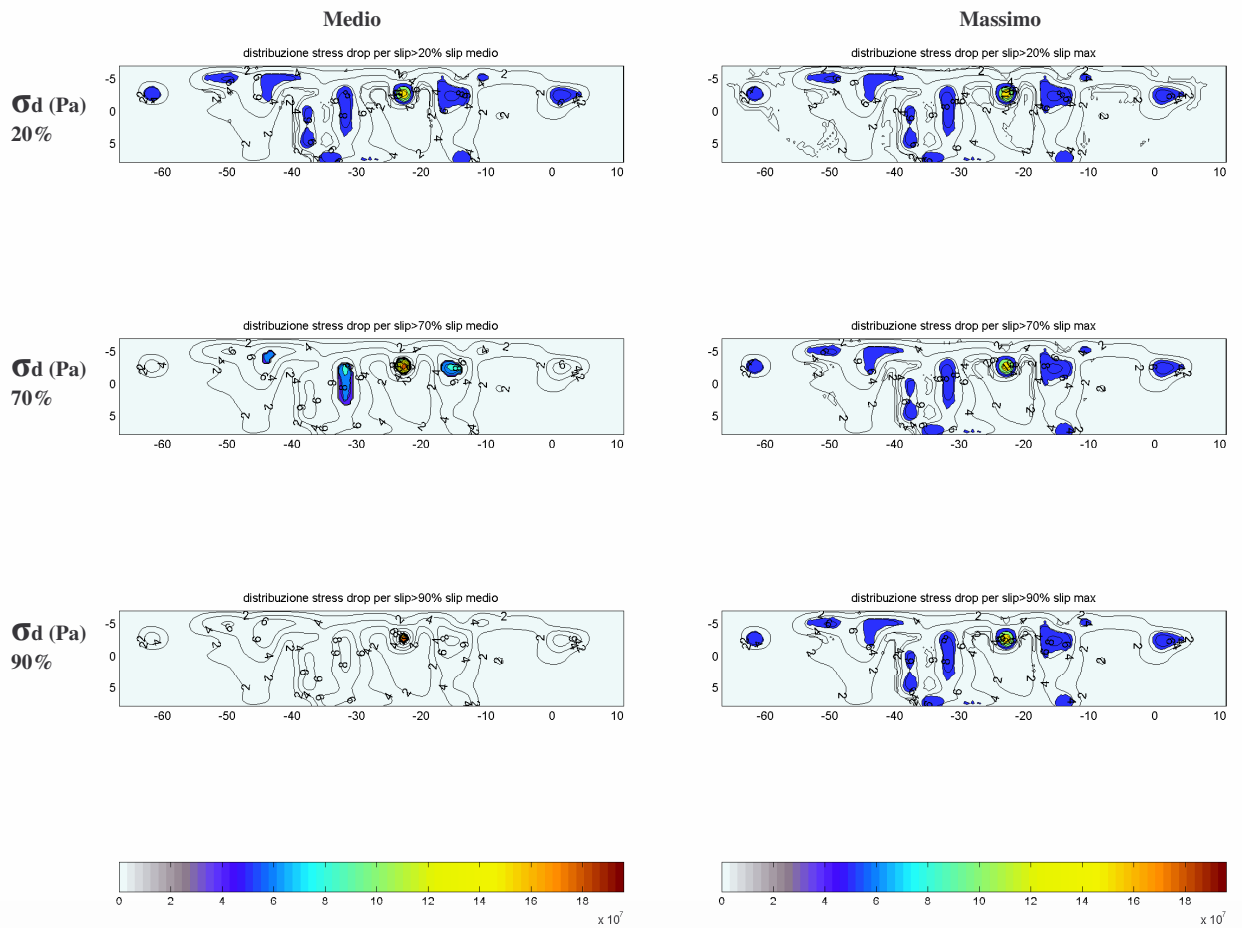
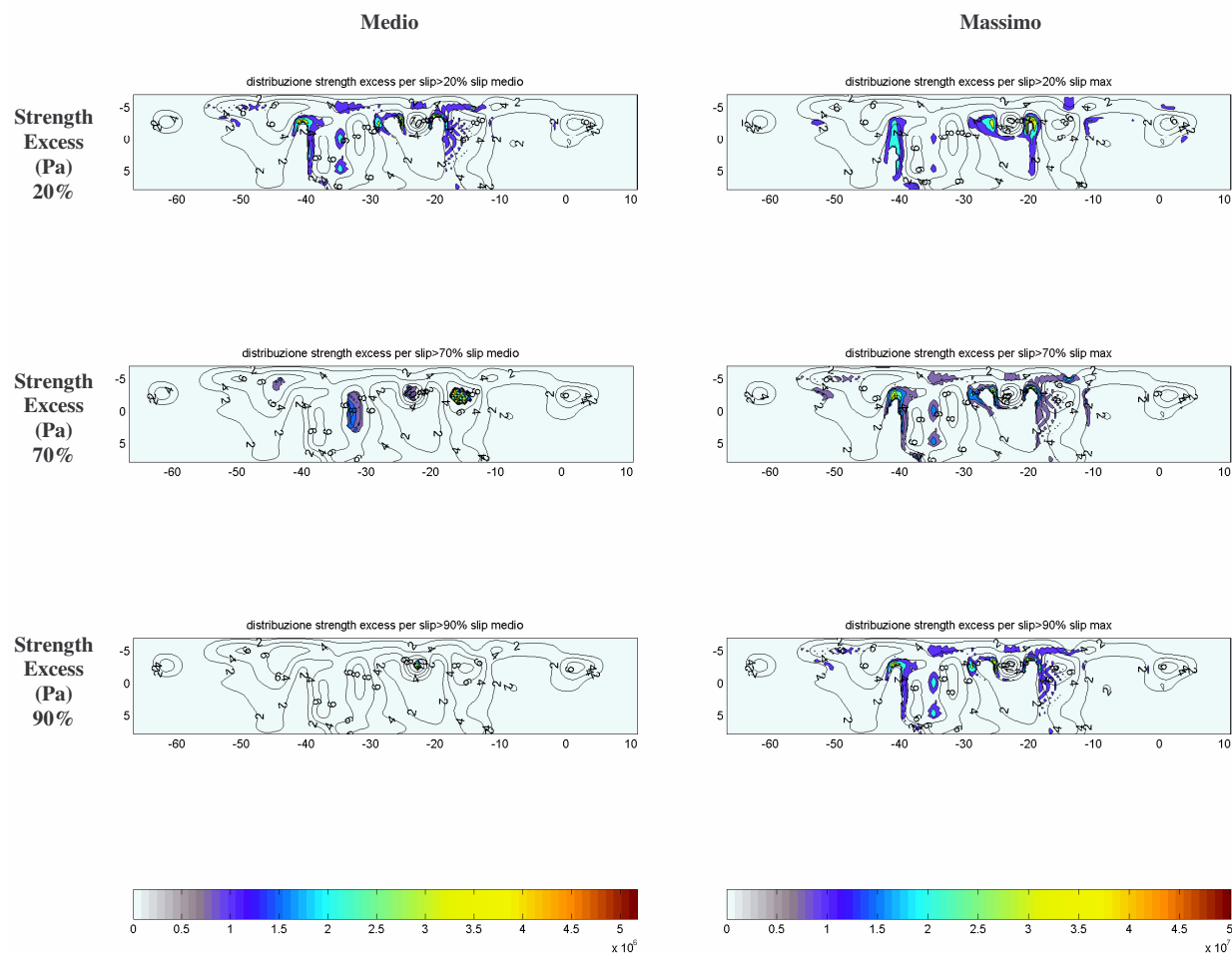
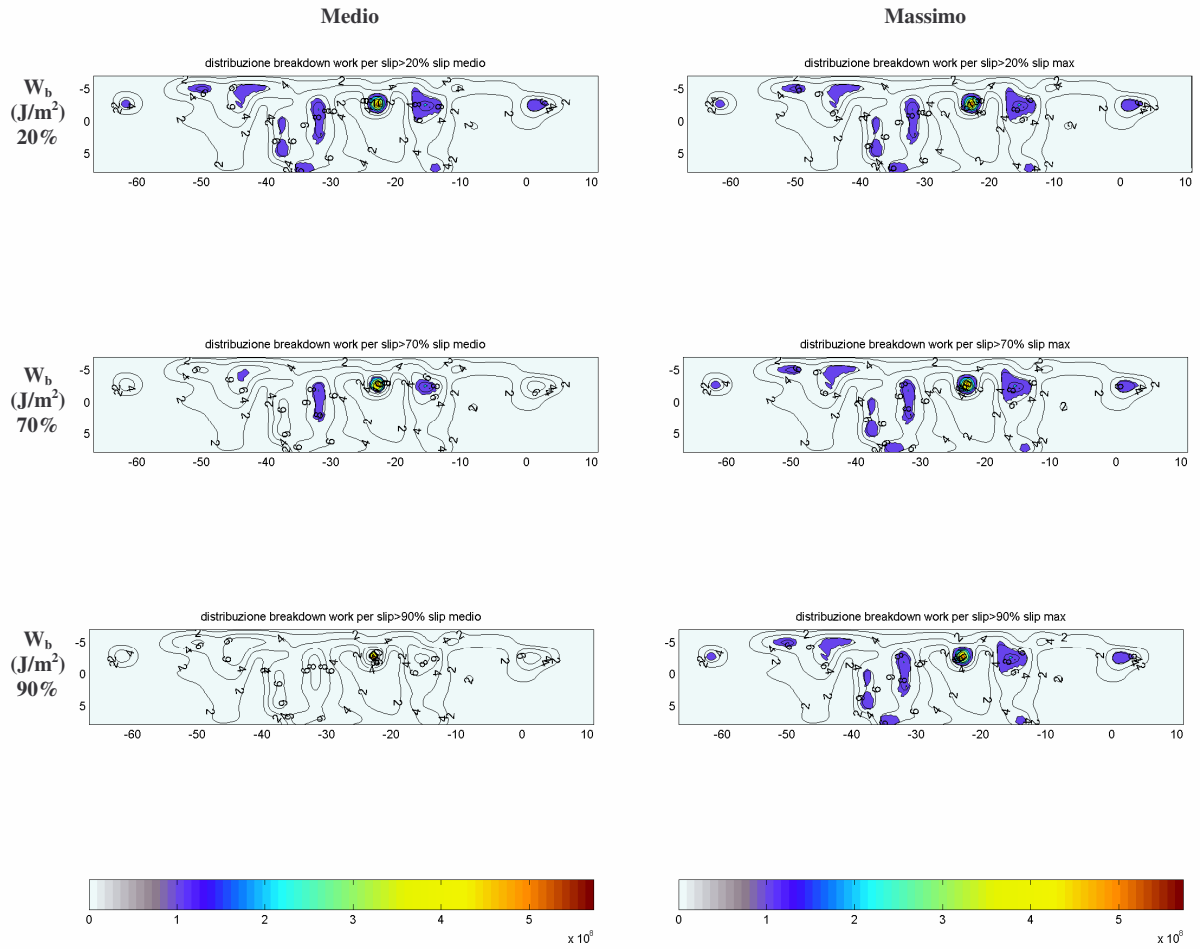


Figura 33: distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In bianco è riportato lo slip (m)





**Figura 34: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



**Figura 35: distribuzione del breakdown work ( $\text{J/m}^2$ ): colonna a sinistra per sottofaglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**

Wb(J/m^2)	We(J/m^2)	Eb(J)	Ee(J)		
2.03e+007	2.15e+007	2.41e+016	2.57e+016		
stress(Pa)	strength(Pa)	breakstress(Pa)			
1.40e+007	6.93e+006	2.10e+007			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
2.55e+007	2.41e+016	4.46e+007	2.32e+016	3.79e+007	2.37e+016
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
7448	5913	3255	3909		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
4.35e+007	2.33e+016	4.74e+008	6.07e+014	1.69e+008	4.63e+015
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
7448	3345	8	171		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
1.79e+007	1.06e+011	2.92e+007	9.51e+010	2.56e+007	1.00e+011
>20(ave) Wstress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
2.87e+007	9.59e+010	1.77e+008	1.41e+009	7.85e+007	1.34e+010
>20(max) Wstrength	>20(max) strength	>90(max) Wstrength	>90(max) strength	>70(max) Wstrength	>70(max) strength
7.28e+006	4.31e+010	5.70e+006	1.86e+010	5.98e+006	2.34e+010
>20(ave) Wstrength	>20(ave) strength	>90(ave) Wstrength	>90(ave) strength	>70(ave) Wstrength	>70(ave) strength
5.75e+006	1.92e+010	2.93e+006	2.35e+007	4.35e+006	7.44e+008
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
10.7	2.5				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofoglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofoglie e a seguire il numero delle sottofoglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70% e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

### 1.7.2 Hernandez

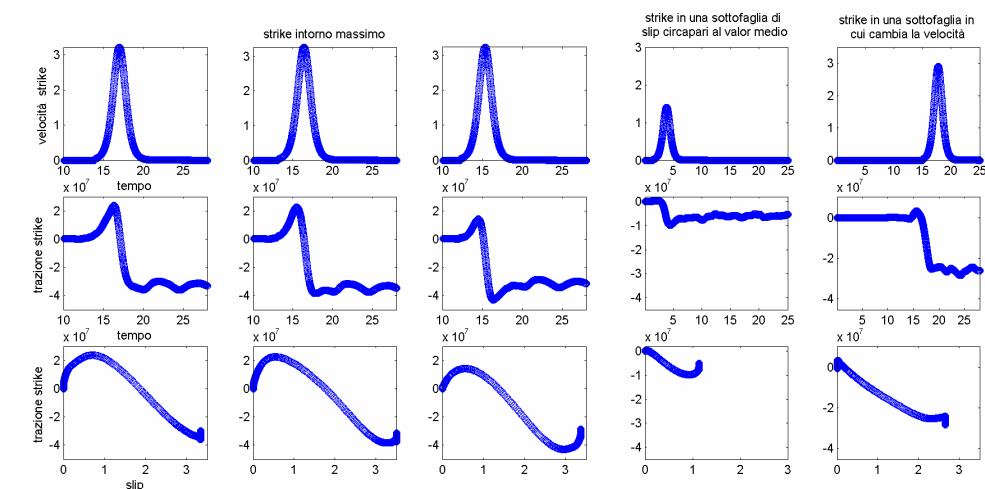
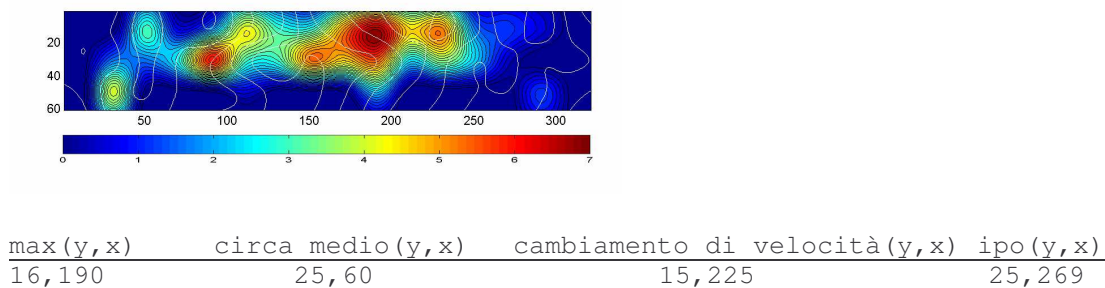


Figura 36: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

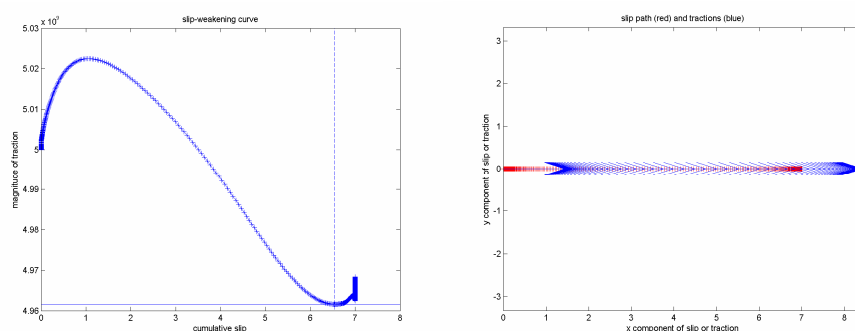
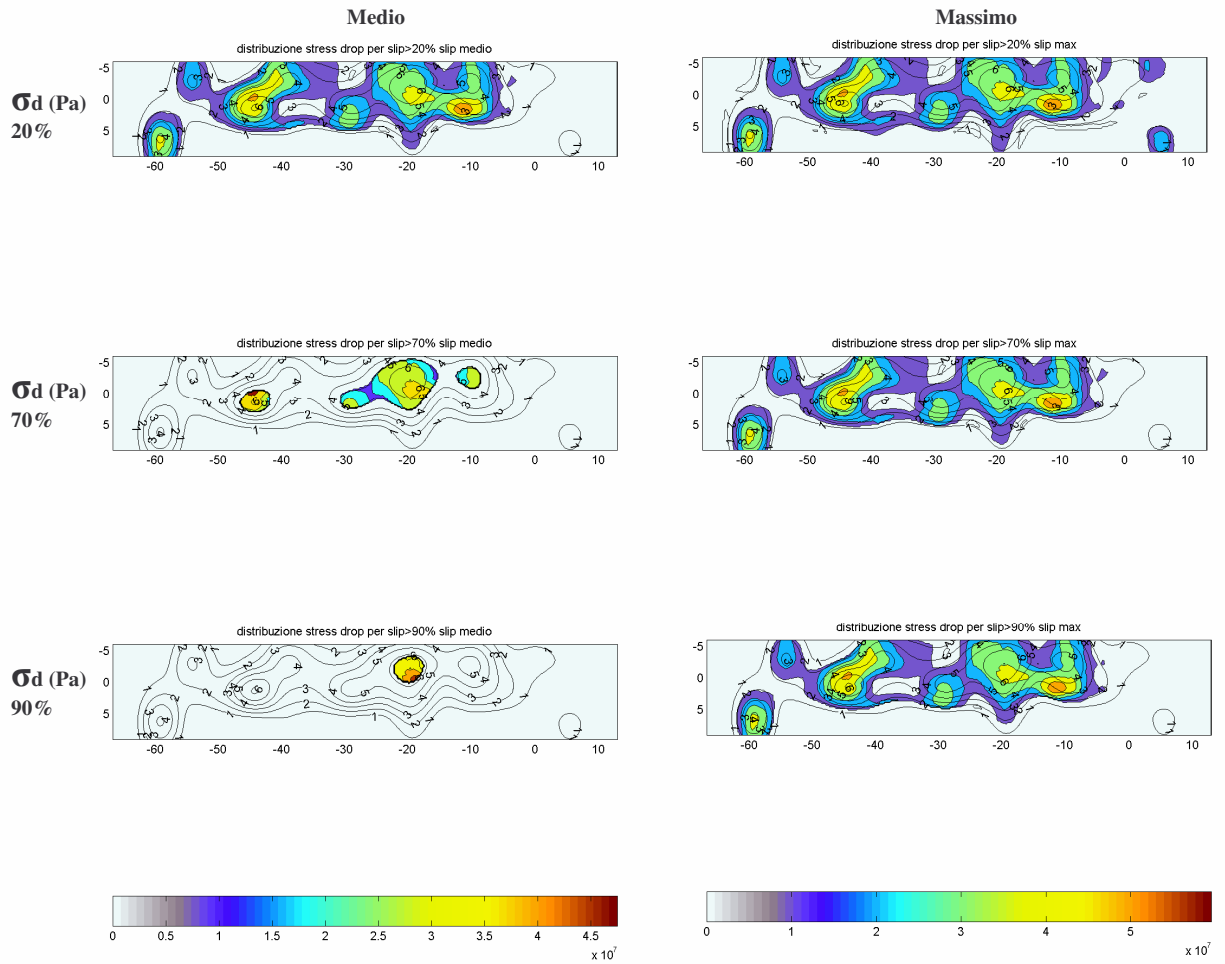
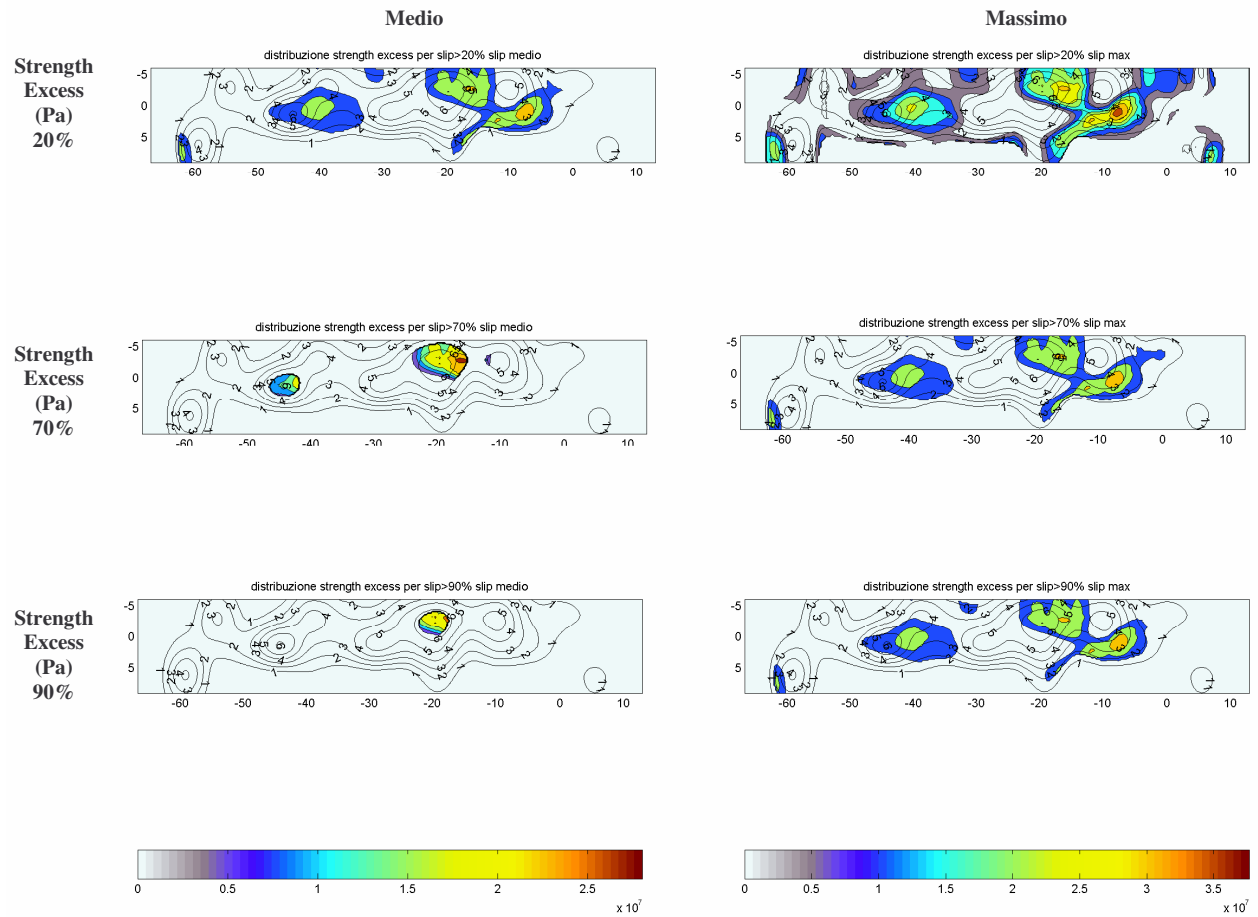


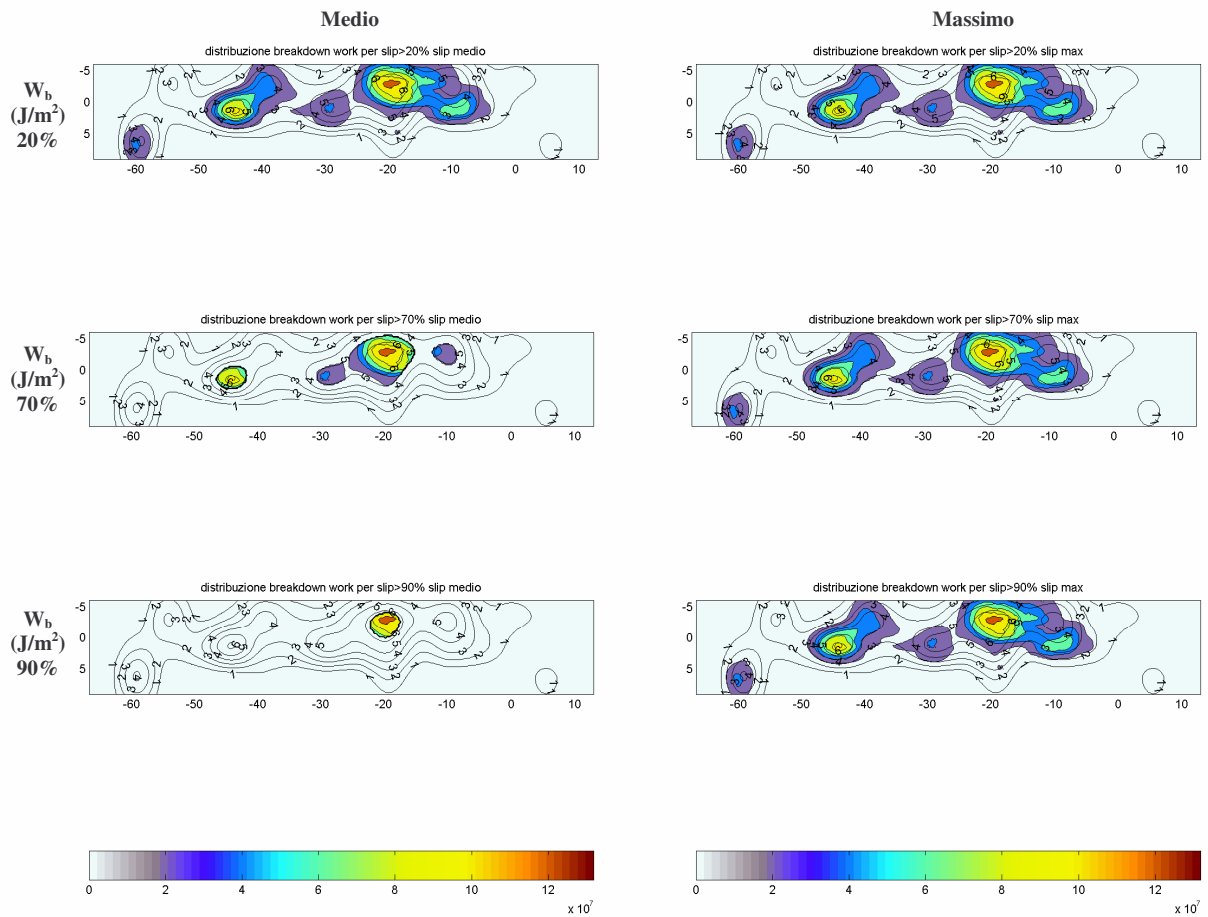
Figura 37: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.



**Figura 38:** distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. Inbianco è riportato lo slip (m)



**Figura 39: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



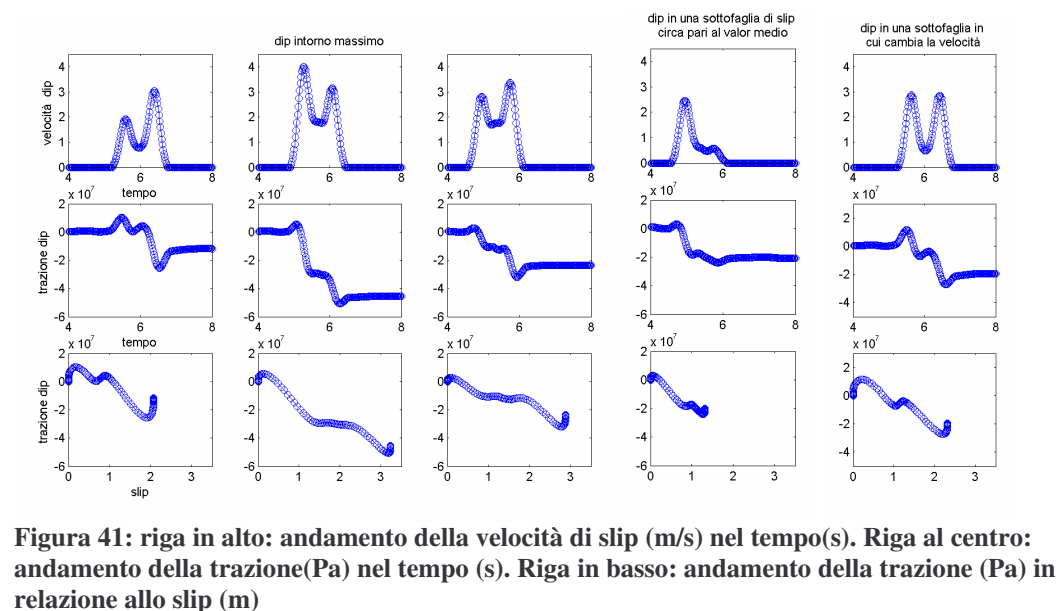
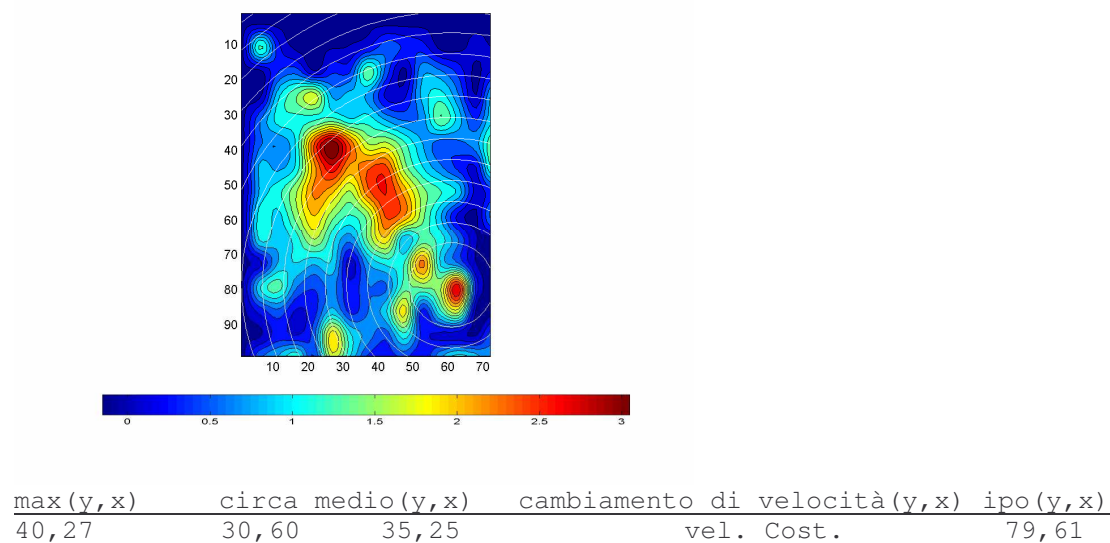
**Figura 40:** distribuzione del breakdown work ( $\text{J/m}^2$ ): colonna a sinistra per sottofaglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)

Wb(J/m^2)	We(J/m^2)	Eb(J)	Ee(J)		
1.46e+007	1.49e+007	1.78e+016	1.82e+016		
stress(Pa)	strength(Pa)		breakstress(Pa)		
1.20e+007	6.54e+006	1.86e+007			
>20(max) Wb	>20(max) Eb	>90(max) Wb	>90(max) Eb	>70(max) Wb	>70(max) Eb
2.10e+007	1.78e+016	3.03e+007	1.68e+016	2.77e+007	1.72e+016
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
19581	13544	8873	9941		
>20(ave) Wb	>20(ave) Eb	>90(ave) Wb	>90(ave) Eb	>70(ave) Wb	>70(ave) Eb
2.84e+007	1.71e+016	1.05e+008	1.54e+015	6.12e+007	6.14e+015
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
19581	9643	235	1606		
>20(max) Wstress	>20(max) stress	>90(max) Wstress	>90(max) stress	>70(max) Wstress	>70(max) stress
1.74e+007	2.35e+011	2.28e+007	2.02e+011	2.13e+007	2.12e+011
>20(ave) Wstress	>20(ave) stress	>90(ave) Wstress	>90(ave) stress	>70(ave) Wstress	>70(ave) stress
2.17e+007	2.10e+011	3.88e+007	9.13e+009	3.28e+007	5.26e+010
>20(max) Wstrength	>20(max) strength	>90(max) Wstrength	>90(max) strength	>70(max) Wstrength	>70(max) strength
8.23e+006	1.11e+011	8.72e+006	7.74e+010	8.54e+006	8.49e+010
>20(ave) Wstrength	>20(ave) strength	>90(ave) Wstrength	>90(ave) strength	>70(ave) Wstrength	>70(ave) strength
8.57e+006	8.26e+010	1.86e+007	4.36e+009	1.02e+007	1.63e+010
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
7.0	1.9				

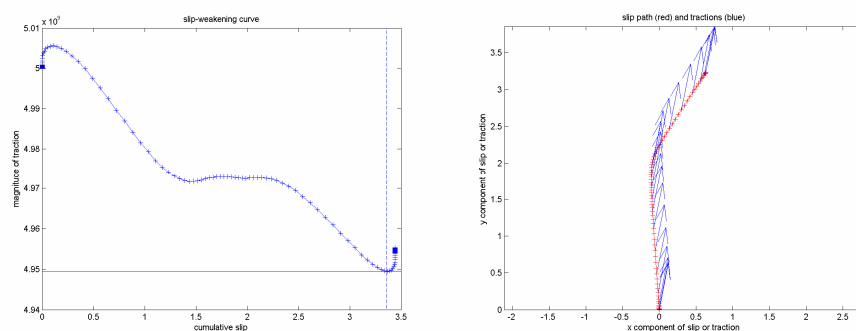
**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofaglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofaglie e a seguire il numero delle sottofaglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70% e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.



## 1.8 Northridge



**Figura 41:** riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)



**Figura 42:** Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.

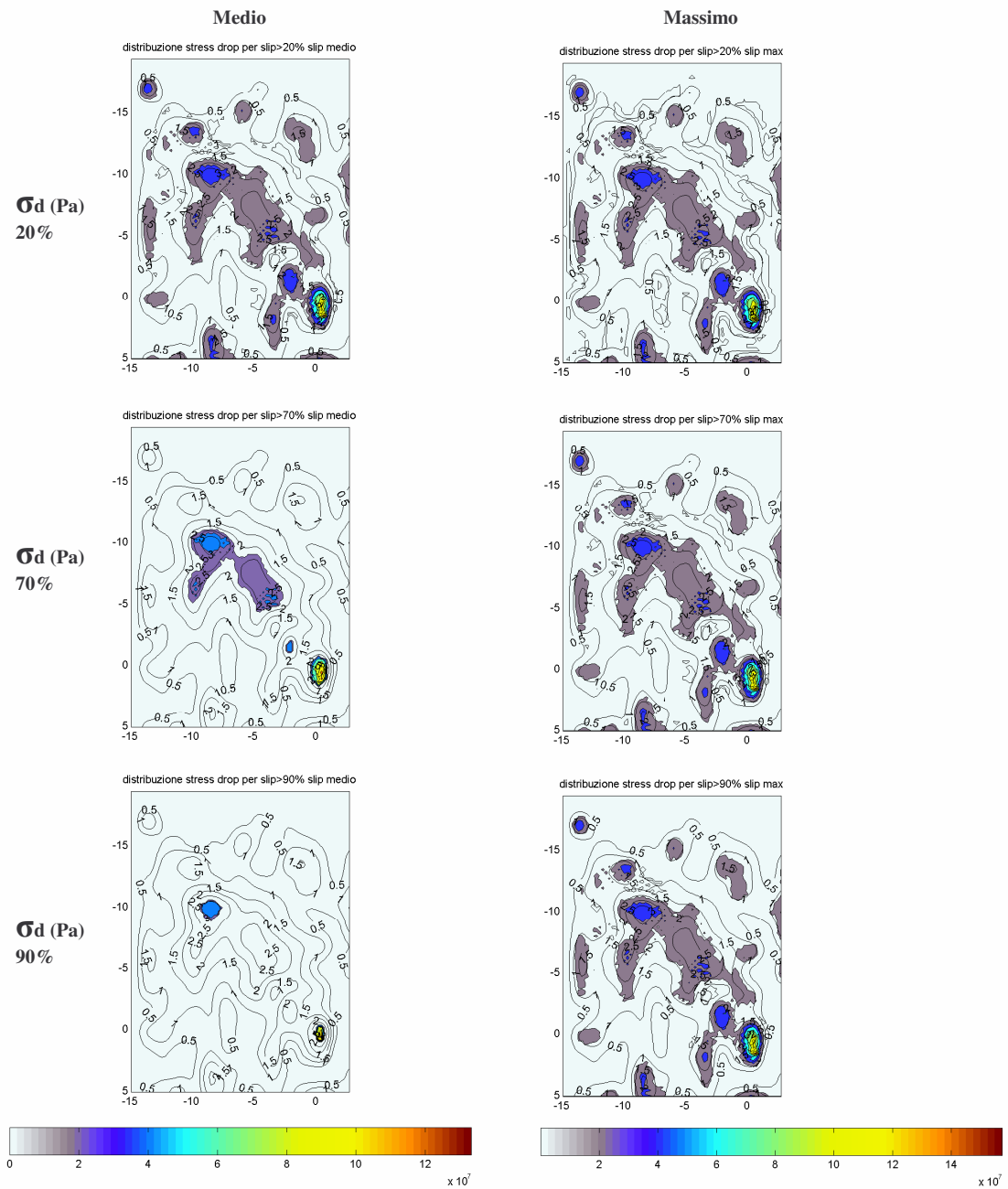
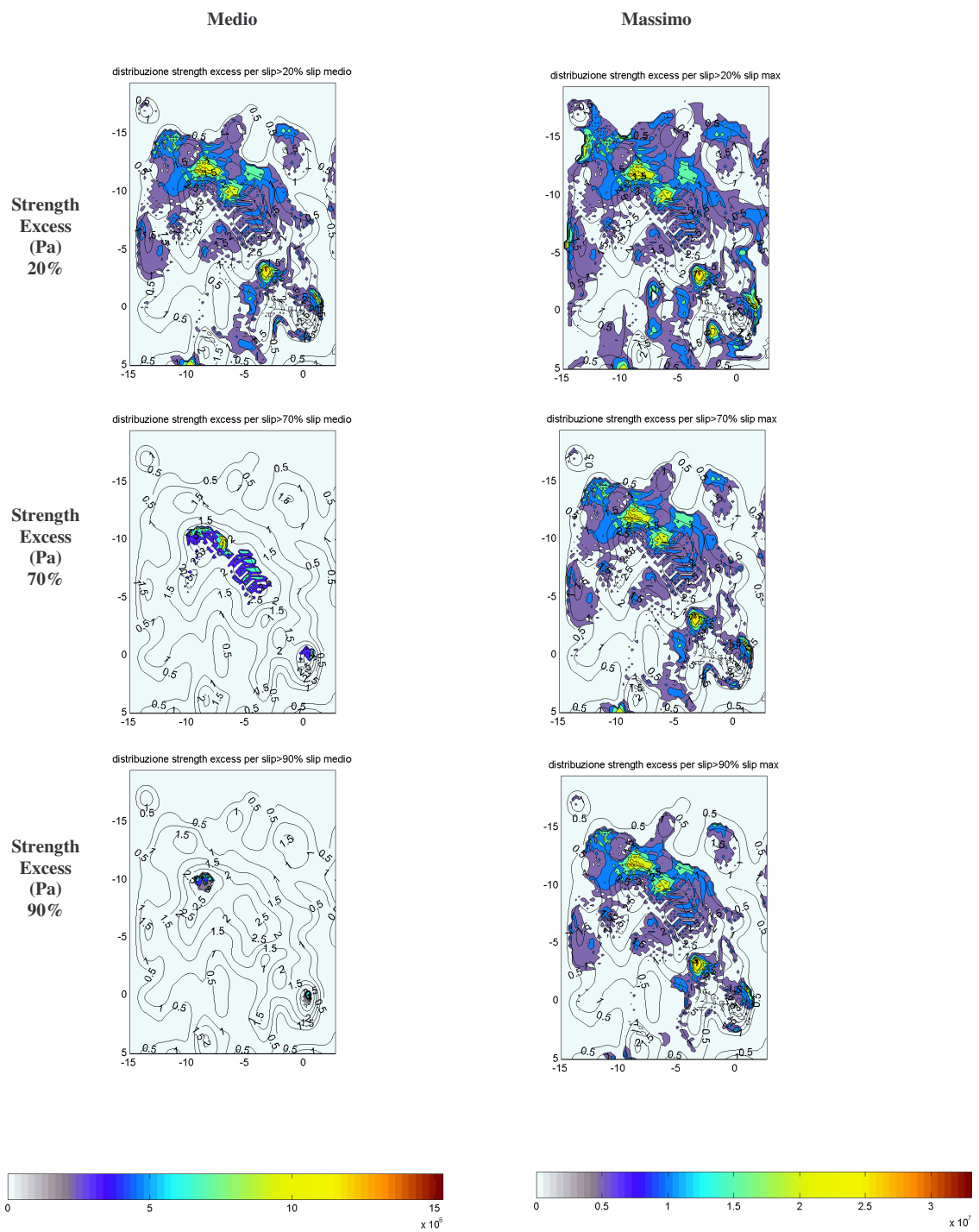
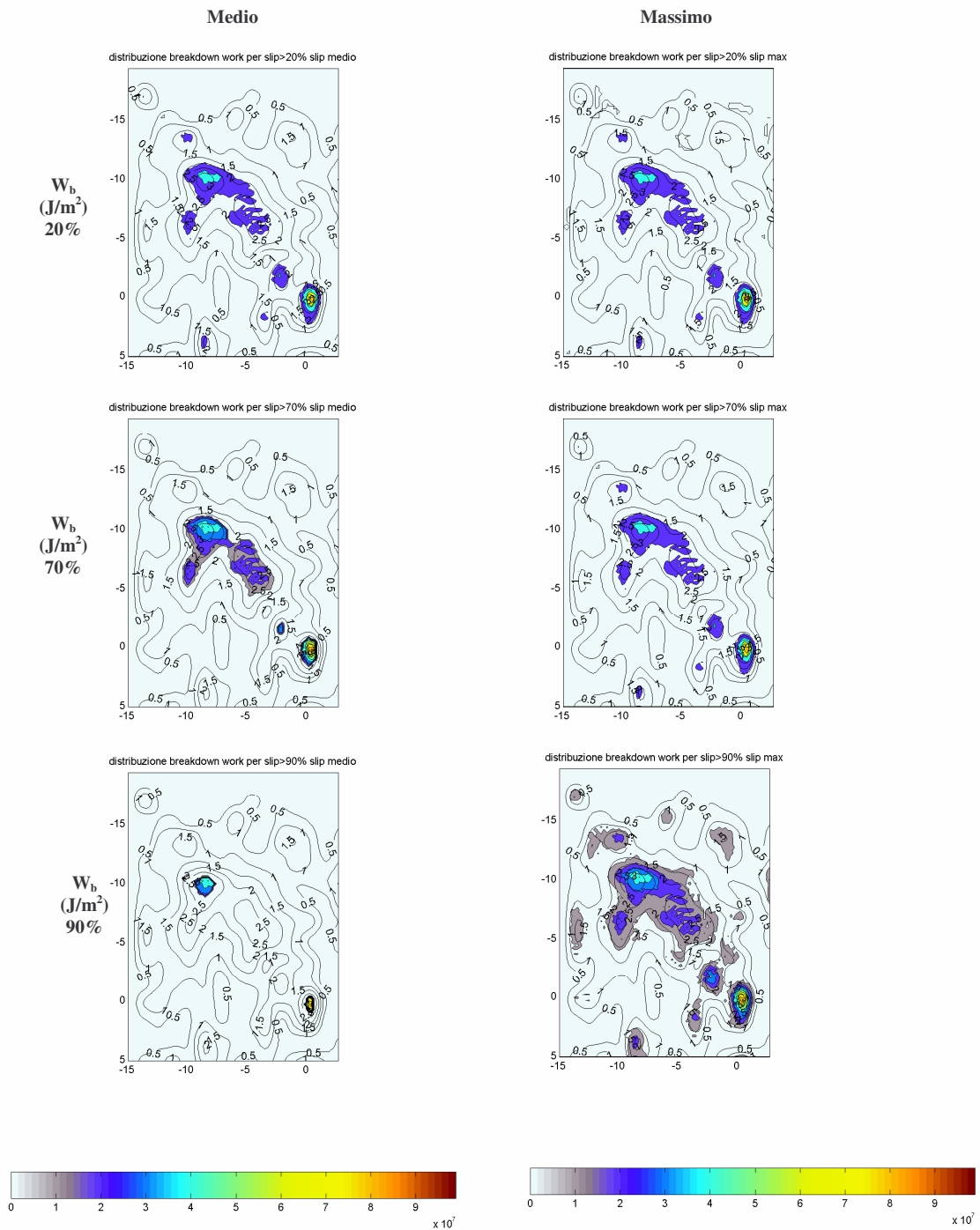


Figura 43: distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. Inbianco è riportato lo slip (m)



**Figura 44: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



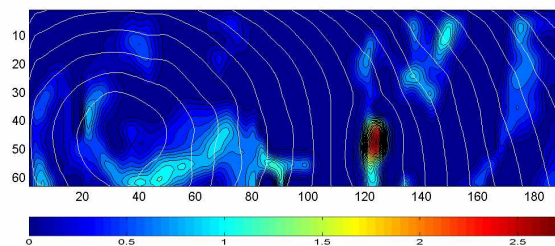
**Figura 45: distribuzione del breakdown work (J/m<sup>2</sup>): colonna a sinistra per sottofaglie di slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie di slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**

## Appendice B

Wb (J/m <sup>2</sup> )	We (J/m <sup>2</sup> )	Eb (J)	Ee (J)		
5.39e+006	5.81e+006	2.40e+015	2.59e+015		
stress (Pa)	strength (Pa)	breakstress (Pa)			
1.15e+007	6.39e+006	1.79e+007			
>20 (max) Wb	>20 (max) Eb	>90 (max) Wb	>90 (max) Eb	>70 (max) Wb	>70 (max) Eb
6.62e+006	2.40e+015	1.01e+007	2.24e+015	8.76e+006	2.34e+015
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
7128	5801	3545	4268		
>20 (ave) Wb	>20 (ave) Eb	>90 (ave) Wb	>90 (ave) Eb	>70 (ave) Wb	>70 (ave) Eb
8.81e+006	2.34e+015	4.71e+007	1.27e+014	2.65e+007	7.04e+014
sf Tot	sf 20	sf 90	sf 70		
7128	4242	43	425		
>20 (max) Wstress	>20 (max) stress	>90 (max) Wstress	>90 (max) stress	>70 (max) Wstress	>70 (max) stress
1.33e+007	7.74e+010	1.94e+007	6.86e+010	1.72e+007	7.36e+010
>20 (ave) Wsress	>20 (ave) stress	>90 (ave) Wstress	>90 (ave) stress	>70 (ave) Wstress	>70 (ave) stress
1.73e+007	7.35e+010	6.15e+007	2.64e+009	3.80e+007	1.62e+010
>20 (max) Wstrength	>20 (max) strength	>90 (max) Wstrength	>90 (max) strength	>70 (max) Wstrength	>70 (max) strength
6.75e+006	3.92e+010	6.25e+006	2.21e+010	6.29e+006	2.69e+010
>20 (ave) Wstrength	>20 (ave) strength	>90 (ave) Wstrength	>90 (ave) strength	>70 (ave) Wstrength	>70 (ave) strength
6.29e+006	2.67e+010	5.30e+006	2.28e+008	6.20e+006	2.63e+009
Max Slip (m)	Av.Slip (m)				
3.3	0.9				

**Tabella:** Con Wb è indicato il valore del breakdown work; con We si indica il valore dell'excess work, ovvero la somma del breakdown work e del restrengthening work; con stress si indica lo stress drop dinamico; con strength lo strength excess; Di seguito sono indicate le medie effettuate sui contributi dati dalle sottofaglie che hanno dislocato del 20 % del 70 % del 90 % rispetto allo slip rispettivamente medio e massimo. Con sf si indica il numero totale delle sottofaglie e a seguire il numero delle sottofaglie sulle quali si sono effettuate le stime al 20 % al 70 % e al 90%. Con Max Slip si indica lo slip massimo, con ave slip lo slip medio.

## 1.9 Morgan Hill



### 1.9.1 Omogeneo

$\max(y, x)$	circa medio( $y, x$ )	cambiamento di velocità( $y, x$ )	ipo( $y, x$ )
47, 124	45, 60	50, 70	45, 33

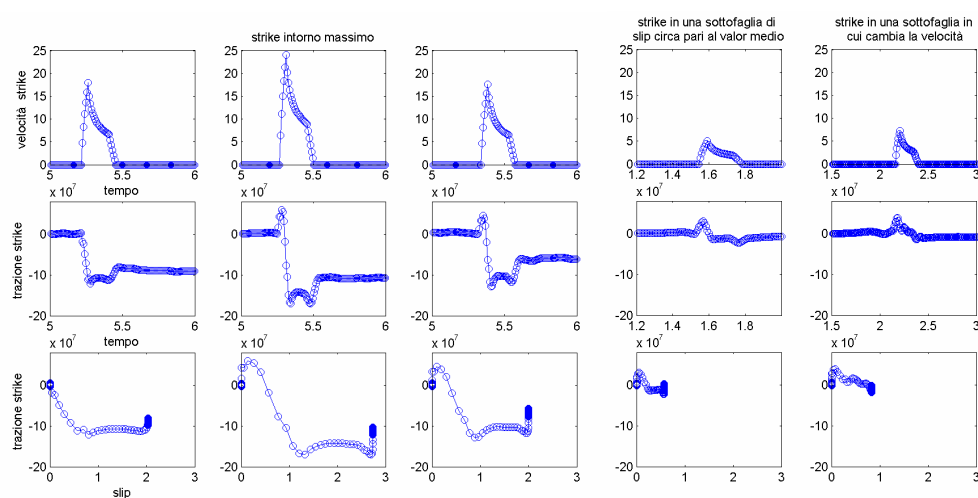


Figura 46: riga in alto: andamento della velocità di slip (m/s) nel tempo(s). Riga al centro: andamento della trazione(Pa) nel tempo (s). Riga in basso: andamento della trazione (Pa) in relazione allo slip (m)

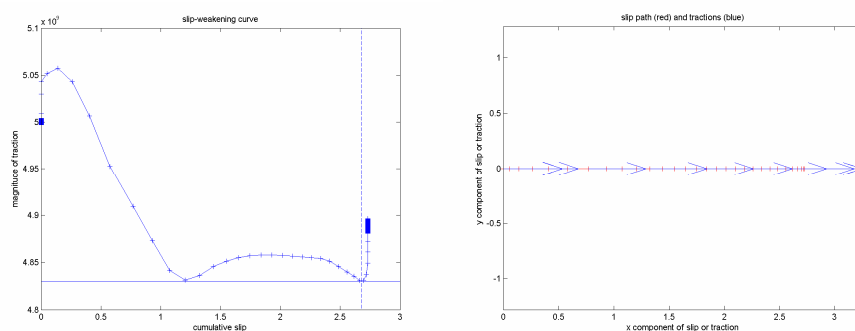
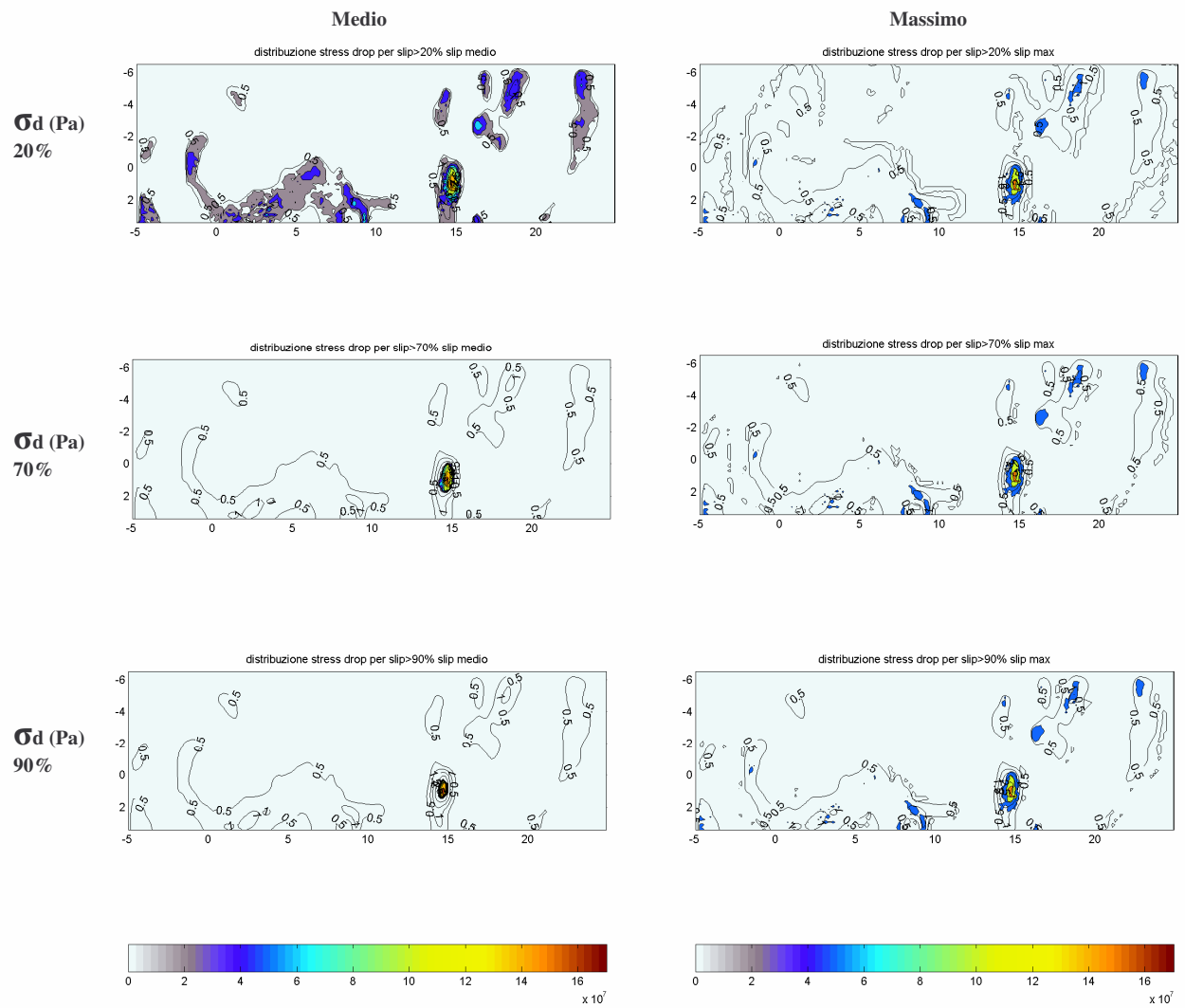
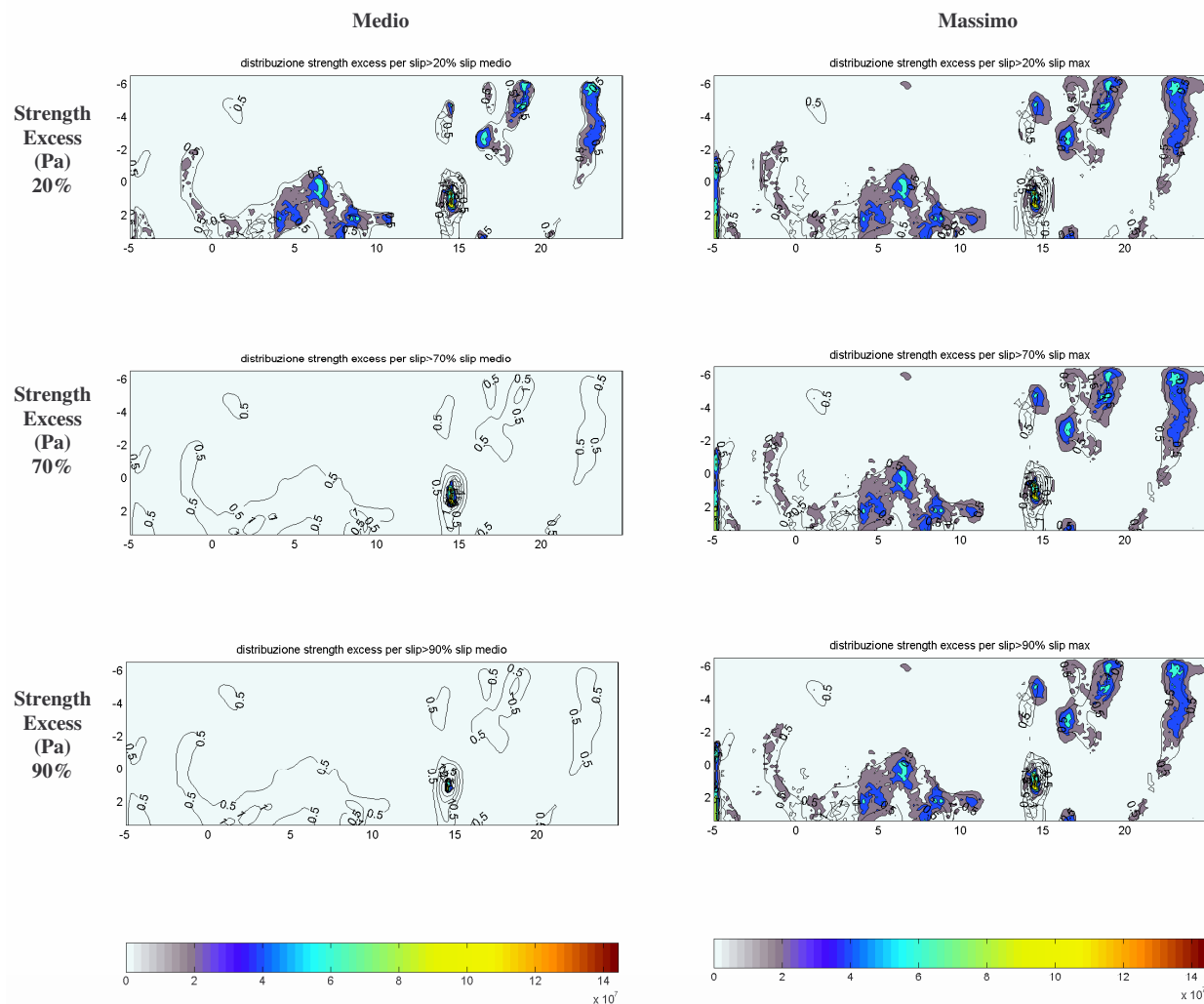


Figura 47: Pannello a sinistra: Evoluzione della trazione (Pa) in relazione allo slip (m) nel punto di massimo slip; Pannello a destra: andamento del rake.



**Figura 48: distribuzione dello stress drop (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. Inbianco è riportato lo slip (m)**



**Figura 49: distribuzione dello strength excess (Pa): colonna a sinistra per sottofaglie con slip >20% >70% >90% dello slip medio; colonna a destra per sottofaglie con slip >20%, 70%, 90% dello slip massimo. In nero è riportato lo slip (m)**



# Bibliografia

Aki, K., and Richards, P.G., 2002, Quantitative Seismology (second edition). University Science Books.

Amato, A., Azzara, R., Chiarabba, C., Cimini, G. B., Cocco, M., Di Bona, M., Margheriti, L., Mazza, S., Mele, F., Selvaggi, G., Basili, A., Boschi, E. (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome, Italy). Courboux, F., Deschamps, A., Geffet, S. (Géosciences Azur, France). Bittirelli, G., Chiaraluce, L., Piccinini, D., Ripepe, M., 1998, The 1997 Umbria – Marche, Italy, Earthquake Sequence: a First Look at the Main Shocks and Aftershocks. Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 15, pp. 2861-2864.

Andrews, D. J., 1973, A numerical study of tectonic stress release by underground explosions, Bull. Seism. Soc. Am., 63.

Andrews, D. J., 1976a, Rupture propagation with finite stress in antiplane strain. J. Geophys. Res. 81, No. 20, 3575 - 3582.

Andrews, D. J., 1976b, Rupture velocity of plane strain shear cracks. J. Geophys. Res. 81, No. 32, 5679-5687

Andrews, D.J., 1985, Dynamic plain-shear rupture with a slip-weakening friction law calculated by a boundary integral method, Bull. Seism. Soc. Am. 75 (1).

Andrews, D.J., 1999, Test of two methods for faulting in finite-difference calculations, Seismol. Soc. Am. Bull., 89,4, 931-937.

Andrews, D. J. 2005, Rupture dynamics with energy loss outside the slip zone, J. Geophys. Res., accepted, doi: 10.1029/2004JB003191

Aochi, H., Fukuyama, E., 2002, Three-dimensional nonplanar simulation of the 1992 Landers earthquake, J. Geophys. Res., 107, (B2),2035, 10.1029/2000JB000061.

Asano, K. and Iwata, T., 2006, Source Process and Near-Source Ground Motion of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 93-98.

Asano, K., Iwata, T. and Irikura, K., 2005, Estimation of Source Rupture Process and Strong Ground Motion Simulation of the 2002 Denali, Alaska, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No 5, 1701-1715.

Barenblatt, G. I., 1959, The formation of brittle cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Appl. Math. Mech.* 23, 1273 - 1282.

Barenblatt G. I., 1959b, Concerning equilibrium crack forming during brittle fracture. The stability of isolated cracks. Relationship with energetic theories, *Appl. Math. Mech.*, 23, 1273-1282

Belluzzi, O., 1970, *Scienza delle Costruzioni vol.I*, Zanichelli, Bologna

Beroza, G.C., and P. Spudich, 1988, Linearized inversion for fault rupture behavior; application to the 1984 Morgan Hill, California, earthquake, *J. of Geophys. Res.*, B, Solid Earth and Planets, 93 (6), 6275-6296.

Bizzarri, A. and Cocco M., 2003, Slip-weakening behavior during the propagation of dynamic ruptures obeying rate- and state- dependent friction laws, *J. Geophys. Res.*, B8, No. 2373.

Bizzarri, A., M. Cocco, D. J. Andrews, and E. Boschi, 2001, Solving the dynamic rupture problem with different approaches and constitutive laws, *Geophys. J. Int.*, 144, 656-678.

Bouchon, M., 1997, The state of stress on some faults of the San Andreas System as inferred from near-field strong motion data, *J. Geophys. Res.*, 102, B6, 11731-1744.

Bouchon, M., Campillo M and Cotton F., 1998, Stress field associated with the rupture of the 1992 Landers, California, earthquake and its implications concerning the fault strength at the onset of the earthquake, *J. Geophys. Res.*, 103, 21091-21097.

Caputo M, *Lectures on Seismology and Rheological Tectonics*, 1999

Campillo, M., Ionescu, I.R., 1997, Initiation of antiplane shear instability under slip dependent friction, *J. of Geophys. Res.*, 102, B9, 20363-20371

Cocco, M., and A. Bizzarri, 2002, On the slip-weakening behavior of rate- and state dependent constitutive laws, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 11, doi:10.1029/2001GL013999.

Cocco M., Bizzarri A., Tinti E., 2004, Physical interpretation of the breakdown process using a rate- and state-dependent friction law, *Tectonophys. " Physics of Active Faults "*, 378, 241-262

Cocco, M., P. Spudich, E. Tinti, 2006, Macroscopic frictional work and energy partitioning during dynamic earthquake propagation, *Geophys. Res. Abstr.*, 8

Cochard, A., R. Madariaga, 1994, Dynamic faulting under rate-dependent friction, *Pure Appl. Geophys.*, 142, 419-445.

Cotton, F. and Campillo M., 1995, Frequency domain inversion of strong motions : application to the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 100, 3961-3975.

Crippa, B., Crosetto, M., Biescas, E. Troise, C., Pingue, F. and De Natale, G., 2006, An Advanced Slip Model for the Umbria-Marche Earthquake Sequence: Coseismic Displacements Observed by SAR interferometry and Model Inversion, *Geophys. J. Int.*, 164, 36-45.

Dalguer, L.A., Irikura K., *Zhang* W., Riera J.D., 2002, Distribution of dynamic and static stress changes during 2000 Tottori (Japan) earthquake: brief interpretation of the earthquake sequences; foreshocks, mainshock and aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 16, doi:10.1029/2001GL014333.

Das, S., and K. Aki, 1977, A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 50, 643-668.

Deschamps, A., Courboux, F., Geffet, S., Lomax, A., Virieux, J., Amato, A., Azzara, R., Chiarabba, C., Cimini, G. B., Cocco, M., Di Bona, M., Margheriti, L., Mazza, S., Mele, F., Selvaggi, Chiaraluce, L., Piccinini, D., Ripepe, M., 2000, Spatio-Temporal Distribution of Seismic Activity During the Umbria-Marche Crisis, 1997. *Journal of Seismology*, 4, 377-386

Dieterich. J. H., 1992, Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength. *Tectonophysics*, 211, 115 - 134

Dieterich. J. H., 1994, A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J. Geoph. Res.*, 99, 2601-2618

Dieterich, J. H., B. Kilgore, 1994, Direct observations of frictional contacts: new insights for state-dependent properties, *Pure Appl. Geophys.*, 143, 283-302

Dreger, D. S., Gee, L., Lombard, P., Murray, M. H. and Romanowicz, B., 2005, Rapid Finite-source Analysis and Near-fault Strong Ground Motions: Application to the 2003 Mw 6.5 San Simeon and 2004 Mw 6.0 Parkfield Earthquake, *Seismological Research Letters*, Vol. 76, No 1, 40-48

Ekstrom, G., Morelli, A., Boschi, E., Dziewonski, A. M., 1998, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No 11, 1971-1974.

Fukuyama, E., Ellsworth W.L, Waldhauser F. and Kubo A., 2003, Detailed fault structure of the 2000 Western Tottori, Japan, earthquake sequence, *Bull. Seismol Soc. Am.*, 93(4), 1468-1478.

Fukuyama, E., and R. Madariaga, 1998, Rupture dynamics of a planar fault in a 3-D elastic medium: rate- and slip-weakening friction, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 1-17.

Fukuyama, E. 2003, Numerical modeling of earthquake dynamic rupture. Requirements for a realistic modelling, *Bull. of earthquake Res. Inst.*, 78,167-174

Giudice, G, Dispense 2005

Guatteri, M. and Spudich P., 2000, What can strong-motion data tell us about slip-weakening fault-friction laws?, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 90 (1), 98-116

Hartzell S. H. and Heaton T. H., 1983, Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 73, 1553-1583.

Hernandez, B., Cotton F. and Campillo M., 1999, Contribution of Radar Interferometry to a Two-Step Inversion of the Kinematic Process of the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No B6, 13083-13099.

Hernandez, B., Cotton F., Campillo M., Courboux F., Cocco M. And Stramondo S., 2005, Rupture history of the 1997 Umbria Marche (Central Italy) earthquakes from the inversion of GPS, SAR and strong motion data, *Annals of Geophys.*, in press.

Ida, Y., 1972, Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy. *J. Geophys. Res.* 77, 3796-3805.

Kaverina, A., D. Dreger and E. Price, 2002, The combined inversion of seismic and geodetic data for the source process of the 16 October 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 1266-1280.

Kostrov, B. V., 1964, Self-similar problems of propagation of shear cracks, *J. Appl. Math. Mech.*, 28, 1077-1087.

Kostrov, B.V., and S. Das, 1988, *Principles of Earthquake source mechanics*, Cambridge University Press.

Lavallée, D., and R.J. Archuleta, 2003, Stochastic modeling of slip spatial complexities for the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 30,5, doi:10.1029/2002GL015839.

Liu, P., Custodio, S. and R.J. Archuleta, 2006, Kinematic Inversion of the 2004 Mw 6.0 Parkfield Earthquake Including an Approximation to Site Effects, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1-37.

Madariaga, R., K.B. Olsen, 2002, Earthquake dynamics, *Int. Handbook of earthquake eng.seismology*, 81A

Mai, P.M. R., Sommerville, A, Pitarka, L. Dalgner, S. Song, G. Beroza, H, Miyake, K. Irakura, On Scaling of Fracture Energy and Stress Drop In Dynamic Rupture Models: Consequences for Near Source Ground - Motions

Mikumo, T. and Miyatake T., 1995, Heterogeneous distribution of dynamic stress drop and relative fault strength recovered from the results of wave-form inversion - the 1984 Morgan-Hill, California earthquake, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 85 (1), 178-193.

Mikumo, T., Olsen K.B., Fukuyama E. and Yagi Y., 2003, Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 93, 1, 264-282.

Nielsen, S., and R. Madariaga, 2003, On the self-healing fracture mode, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 93 (6), 2375-2388.

Oglesby, D. D., Dreger, D. S., Harris, R. A., Ratchkovski, N. and Hansen R., 2004, Inverse Kinematic and Forward Dynamic Models of the 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 94, No 6B, S214-S233.

Olsen, K. B., R. Madariaga, and R. J. Archuleta, 1987, Three-dimensional dynamic simulation of the 1992 Landers earthquake, *Science*, 278 (5339), 834-838.

Piatanesi, A., E. Tinti, M. Cocco and E. Fukuyama, 2004, The dependence of traction evolution on the earthquake source time function adopted in kinematic rupture models, *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2003GLO 19225.

Quin, H., 1990, Dynamic stress drop and rupture dynamics of the October 15, 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Tectonophys.*, 175, 93-117.

Rice J. R., 1993, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, 98, 9885-9907.

Rice, J.R., and M., Cocco, 2005, Seismic fault rheology and earthquake dynamics, Dahlem Workshop on *The Dynamics of Fault Zones*.

Rice, J.R., C.G. Sammis and R. Parsons, 2004, Off-fault secondary failure induced by a dynamic slip-pulse,, submitted to *Seismol Soc. Am. Bull*

Ruina, A. L., 1980, Friction laws and instabilities: a quasistatic analysis of some dry frictional behavior, Ph. D. Thesis in Engineering at Brown University, Providence, RI

Ruina, A. L., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.* 88, No. B12, 10359- 10370

Salvi, S., Stramondo, S., Cocco, M., Tesauro, M., Hunstand, I., Anzi dei, M., Briole, P., Baldi, P., Sansosti, E., Fornaio, G., Lanari, R., Doumaz, F., Pesci, A. and Galvani, A., 2000, Modeling Coseismic Displacements Resulting from SAR Interferometry and GPS Measurements During the 1997 Umbria-Marche Seismic Sequence, *Journal of Seismology*, 4, 479-499.

Scholz, C. H., 1990, The mechanics of earthquake and faulting, Cambridge Univ. Press

Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, Y. and Mitsuyuki, H., 1996, Minute Locating of Faulting Beneath Kobe and the Waveform Inversion of the Source Process During the 1995 Hyogo-Ken Nanbu, Japan, Earthquake Using Strong Ground Motion Records, *Journal Phys. Earth*, 44, 473-487.

Sekiguchi, H. and T. Iwata, 2002, Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong-motion waveforms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 300-311.

Spudich, P., Guatteri, M., Otsuki, K., and Minagawa, J., 1998, Use of fault striations and dislocation models to infer tectonic shear stress during the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 88, 413-427.

Spudich, P., and M. Guatteri, 2004, The effect of bandwidth limitations on the inference of earthquake slip-weakening distance from seismograms, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, 94 (6), 2028-2036.

Spudich, P. and Xu L., 2002, Software for calculating earthquake ground motions from finite faults in vertically varying media, CD accompanying *International Handbook of Earthq. and Eng. Seismol.*, V.2.

Stein, S, and Wysession, M, *An Introduction to seismology , earthquakes. and the earth structure* 2003

Takeo, M., 1987, An inversion method to analyse the rupture process of earthquakes using near-field seismograms, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 490-513.

Tinti, E., A. Bizzarri, A. Piatanesi, and M. Cocco, 2004, Estimates of slip weakening distance for different dynamic rupture models, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L02611, doi: 10.1029/2003GL018811

Tinti E., A. Bizzarri, and M. Cocco, 2005a, Modeling the dynamic rupture propagation on heterogeneous faults with rate- and state- dependent friction, submitted to *Annals of Geophys.*

Tinti, E., E. Fukuyama, A. Piatanesi and M. Cocco, 2005b, A kinematic source time function compatible with earthquake dynamics, submitted to *Seismol. Soc. Am. Bull.*

Tinti E., P. Spudich, M. Cocco 2005c, Earthquake fracture energy inferred from kinematic rupture models, submitted to *J. Geophys. Res.*

Wald, D. J., 1996, Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *Journal of Physics of the Earth*, 44 (5), 489-503.

Wald, D. J., Helmberger, D. V. and Hartzell, S. H., 1990, Rupture Process of the 1987 Superstition Hills Earthquake from the Inversion of Strong-Motion Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 80, No 5, 1079-1098.

Wald, D. J., and T.H. Heaton, 1994, Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California, earthquake, Seismol. Soc. Am. Bull., 84 (3), 668-691.

Wald, D. J., T.H. Heaton, and K.W. Hudnut, 1996, The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data, Seismol. Soc. Am. Bull., 86 (1, Part B Suppl), 49-70.

Yoshida, S., K. Koketsu, B. Shibazaki, T. Sagiya, T. Kato, Y. Yoshida, 1996, Joint inversion of near-and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, J. Phys. Earth, 44, 437-454.

[http://pasadena.wr.usgs.gov/office/wald/slip\\_models.html](http://pasadena.wr.usgs.gov/office/wald/slip_models.html)

<http://www.seismo.ethz.ch/staff/martin/martin.html>

<http://www.usgs.gov/>